



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA

Dpto. de Ingeniería de Procesos

**D. ANTONIO NIZARDO BENÍTEZ VEGA, EN CALIDAD DE SECRETARIO
DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS DE LA
UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA,**

CERTIFICA

Que la Comisión de Doctores del Departamento de Ingeniería de Procesos, en su sesión de fecha 29/07/2011, tomó el acuerdo de dar el consentimiento para su tramitación, a la Tesis Doctoral titulada "Análisis de procesos de membrana. Desalinización de aguas salobres", presentada por el Doctorando D. Enrique Ruiz Saavedra y dirigida por los Dres. D. Antonio Gómez Gotor y D. Sebastián O. Pérez Báez.

Y para que así conste a efectos de lo previsto en el Art. 6.2 del Reglamento para la elaboración, tribunal, defensa y evaluación de tesis doctorales de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, firmo la presente en Las Palmas de Gran Canaria, a veintinueve de julio de dos mil once.



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

Departamento: INGENIERÍA DE PROCESOS



Título de la Tesis

ANÁLISIS DE PROCESOS DE MEMBRANA DESALINIZACIÓN DE AGUAS SALOBRES

Tesis Doctoral presentada por:

D. Enrique Ruiz Saavedra

Dirigida por:

Dr. D. Antonio Gómez Gotor

Dr. D. Sebastián Ovidio Pérez Báez

Los Directores,

El Doctorando,

Las Palmas de Gran Canaria, Julio de 2.011

Agradecimientos:

A la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Al Dr. D. Antonio Gómez Gotor y al Dr. D. Sebastián Ovidio Pérez Báez, Directores de esta Tesis, por la dedicación que me han prestado y la ayuda que me han proporcionado para lograr el documento que se presenta.

A D. José Corujo por la ayuda prestada en el análisis químico de las muestras.

Al Dr. D. Alejandro Ramos Martín, por su valiosa colaboración y ayuda desinteresada en las simulaciones del procedimiento de diseño.

A mi esposa e hijos por el apoyo que me han prestado en todo momento para lograr terminar la Tesis.

A mi esposa Ana.

A mis hijos Alejandro y Natalia.

A mi padre q.e.p.d.

ÍNDICE

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.- Introducción y objetivos.	2
---------------------------------	---

CAPITULO II: ANTECEDENTES HISTÓRICOS

2.1.- Antecedentes históricos.	8
--------------------------------	---

LISTA DE SÍMBOLOS.	24
--------------------	----

REFERENCIAS.	25
--------------	----

CAPITULO III: DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS Y COMPONENTES DE UNA PLANTA

3.1.- Conceptos generales. Terminología.	29
------------------------------------------	----

3.1.1.- El proceso de osmosis inversa.	29
----------------------------------------	----

3.1.2.- Sistemas componentes. Definiciones.	32
---------------------------------------------	----

3.2.- Membranas.	39
------------------	----

3.3.- Bombas.	60
---------------	----

3.3.1.- Bombas centrífugas.	61
-----------------------------	----

3.3.2.- Bombas de desplazamiento positivo.	63
--------------------------------------------	----

3.4.- Pretratamientos.	66
------------------------	----

3.4.1.- Justificación del sistema de pretratamiento. Objetivos.	70
-----------------------------------------------------------------	----

3.4.2.- Tipos de ensuciamientos. Causas, efectos y soluciones.	74
----------------------------------------------------------------	----

3.4.3- Ensuciamientos biológicos.	76
-----------------------------------	----

3.4.4- Ensuciamientos por atascamientos.	80
------------------------------------------	----

3.4.5.- Ensuciamiento por incrustaciones.	90
-------------------------------------------	----

3.4.6.- Índices de saturación. Determinaciones.	100
-------------------------------------------------	-----

3.4.7.- Conclusiones. Ejemplo de aplicación.	117
----------------------------------------------	-----

3.5.- Postratamientos.	123
------------------------	-----

3.6.- Aditivos.	125
-----------------	-----

3.7.- Restauración del rendimiento. Equipo de limpieza.	130
---------------------------------------------------------	-----

3.7.1.- Condiciones para la limpieza.	131
---------------------------------------	-----

3.7.2.- Agentes químicos a emplear.	132
3.7.3.- Equipo de limpieza química.	136
3.7.4.- Limpieza osmótica.	146
3.7.5.- Periodos de parada. Protecciones.	148
3.7.6.- Regeneración de membranas.	149
3.8.- Puesta en operación de plantas de OI.	150
3.8.1.- Instalación.	150
3.8.2.- Puesta en marcha.	152
3.8.3.- Parámetros fundamentales de control.	154
3.8.4.- Datos de mantenimiento.	156
LISTA DE SÍMBOLOS.	158
REFERENCIAS.	160

CAPITULO IV: TERMODINÁMICA DEL PROCESO

4.1.- Introducción.	164
4.2.- Presiones osmóticas.	169
4.2.1.- Ecuación general.	169
4.2.2.- Determinaciones experimentales.	172
4.2.3.- Aplicación al proceso de desalación por OI.	172
4.2.3.1.- Cálculo del coeficiente osmótico.	173
4.2.3.2.- Concentraciones y fracciones equivalentes.	174
4.2.3.3.- Procedimiento de cálculo de la presión osmótica.	176
4.2.3.4.- Cálculo simplificado.	178
4.2.4.- Ejemplo de aplicación.	178
4.2.5.- Presiones osmóticas media y efectiva.	183
LISTA DE SÍMBOLOS.	186
REFERENCIAS.	187

CAPITULO V: FENÓMENOS DE TRANSFERENCIA A TRAVÉS DE LAS MEMBRANAS

5.1.- Aplicación de los procesos de filtración por membranas.	190
5.2.- Ecuaciones de transporte.	192

5.2.1.- Rendimiento de las membranas. Factores que lo afectan.	194
5.3.- Polarización de la concentración.	197
5.3.1.- Concepto de polarización de la concentración.	197
5.3.2.- Efectos en el proceso de desalación por OI.	200
5.3.3.- Soluciones prácticas.	200
5.3.4.- Análisis teórico del fenómeno.	202
5.3.5.- Aplicación al caso de módulos de arrollamiento en espiral.	206
5.4.- Influencias de la temperatura, compactación y ensuciamiento.	211
5.5.- Diseño del sistema de OI.	215
5.5.1.- Guías de diseño.	215
5.5.2.- Tipos de sistemas de OI a considerar.	217
5.5.3.- Elección del sistema de OI.	224
5.5.4.- Características de operación del sistema.	230
5.5.5.- Ecuaciones y parámetros de diseño.	233
5.5.6.- Filosofía del diseño propuesto.	259
5.5.7.- Procedimiento de diseño.	268
5.5.8.- Aplicación práctica. Simulaciones.	271
5.5.8.1.- Simulación 1 (600 m ³ /día).	271
5.5.8.2.- Simulación 2 (400 m ³ /día).	281
5.5.8.3.- Simulación 3 (500 m ³ /día).	290
5.5.8.4.- Simulación 4 (300 m ³ /día).	301
LISTA DE SÍMBOLOS.	310
REFERENCIAS.	317

CAPITULO VI: DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

6.1.- Condiciones iniciales.	320
6.2.- Diagrama de flujos.	321
6.3.- Características.	323
6.3.1.- Sistema de pretratamiento.	323
6.3.2.- Sistema de tratamiento.	329
6.3.3.- Equipos auxiliares.	335
LISTA DE SÍMBOLOS.	342

REFERENCIAS.	343
--------------	-----

CAPITULO VII: DATOS Y ANÁLISIS DE LA PLANTA

7.1.- Evolución de los parámetros característicos de la planta.	346
7.2.- Toma de muestras y análisis de las mismas.	349
7.3.- Normalización del rendimiento del sistema de OI.	362
7.3.1.- Objetivos.	362
7.3.2.- Método de normalización.	363
7.3.3.- Condiciones normales.	365
7.3.4.- Procedimiento de cálculo.	366
7.4.- Estado actual.	371
LISTA DE SÍMBOLOS.	372
REFERENCIAS.	373

CAPITULO VIII: CONCLUSIONES

8.1.- Conclusiones.	376
---------------------	-----

ANEXOS

ANEXO 1: Procedimiento de diseño.	380
ANEXO 2: Evolución de los parámetros de la planta (Tablas).	435
ANEXO3: Evolución de los parámetros de la planta (Gráficos).	454

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.- Introducción y objetivos.

1.1.- Introducción y objetivos.

Desde los comienzos de la tecnología de la osmosis inversa (OI) y a medida que se han ido descubriendo todas sus posibles aplicaciones, muchos de los trabajos sobre el tema han sido desarrollados para obtener nuevos y más realizables materiales (polímeros), en la fabricación de membranas. Conjuntamente con la elaboración de modelos matemáticos que intenten explicar el comportamiento físico-químico de las mismas, en relación con la transferencia o transporte de masa a través de su superficie.

Dos aspectos económicos son fundamentales en el estudio y diseño de cualquier sistema de OI: el consumo de energía y la vida de las membranas. Esto es debido a que su incidencia sobre el costo total del tratamiento es elevada. Lógicamente, si las membranas de un sistema pueden estar en servicio durante un largo periodo, operando a presiones reducidas, el costo de depreciación de las mismas por unidad de producto obtenido por el sistema, se volverá más pequeño.

Es esencial pues, asumir, predecir o estimar un periodo de vida en operación de las membranas, para poder establecer el costo de tratamiento en cualquier proceso de OI.

La experimentación de las membranas a través de plantas en operación, durante largo tiempo es necesaria, para así poder asegurar la estimación de su vida con un grado aceptable de fiabilidad. Para esta estimación, no se dispone de un método seguro, sobre todo para los casos particulares de plantas industriales, cuyas aguas de alimentación puedan ser variables, contengan materiales susceptibles de ensuciar o deteriorar las membranas, o que impongan unas condiciones de operación fuera del rango normal (estándar) especificado por el fabricante de las mismas. En todos estos casos, los métodos actuales utilizados son propuestos por los propios fabricantes, pero partiendo de unas condiciones del agua de alimentación y de operación preestablecidas y para unos casos concretos difícilmente extrapolables a la práctica.

Por lo expuesto, se hace necesario un método de diseño, ingenieril, fácil y seguro, que permita predecir la vida útil de las membranas, tanto en lo que se refiere a su

productividad y rechazo de sales, como a mínimos de operación aceptables, en parámetros tales como presión, temperatura, recuperación, pH, etc. Esto permitirá establecer una adecuada utilización de los módulos actualmente comercializados, así como una correcta aplicación de cada uno de ellos para cada caso concreto.

Con la expansión de la tecnología, la demanda ha exigido esfuerzos orientados a la búsqueda de membranas, capaces de ofrecer unas óptimas características operacionales. Esto es, altos valores de productividad y rechazo de sales, con consumos energéticos mínimos o lo que es lo mismo, con la presión de operación más reducida posible, y cuyos requerimientos demanden mantenimientos mínimos, garantizándose la operación continua durante el mayor tiempo posible, con un deterioro mínimo de estos parámetros característicos de la membrana.

Conseguido en principio lo anterior, por lo que a la desalación de aguas salobres se refiere, con la aparición en el mercado de la última generación de membranas (PA/TFC/LP) (membranas de Poliamida, Compuestas de Capa Fina y de Baja Presión), capaces de ofrecer producciones aceptables, con rechazos superiores al 98%, a presiones reducidas, y que permiten un amplio rango de pH en operación continua.

Tanto los diferentes fabricantes de plantas de desalación por OI, como los propios usuarios de las mismas, se encuentran con la necesidad de disponer de un método de diseño, capaz de ser aplicado con un mínimo de garantía, a los tipos de aguas salobres de esta región.

Esta necesidad, ha llevado a la adopción de métodos, normalmente proporcionados por los propios fabricantes de membranas, como ya se ha indicado anteriormente, parte interesada en el procedimiento comercial, y que posiblemente debido a estar basados sobre otros tipos de aguas, carecen de información operacional "in situ" y a los escasos datos prácticos recogidos de las plantas actualmente en operación en estas islas, han mostrado considerables porcentajes de error.

Con el trabajo de esta Tesis de Doctorado, "ANALISIS DE PROCESOS DE MEMBRANA. DESALINIZACION DE AGUAS SALOBRES" y sobre la base de la información práctica de que se ha dispuesto, el autor ha pretendido conseguir los siguientes objetivos:

1) Hacer una descripción general de cada uno de los equipos componentes de una planta de desalación de aguas salobres por OI.

2) Recopilación de los fundamentos teóricos de la OI, análisis y adaptación de los mismos, para su aplicación a la desalación de aguas salobres.

3) Describir la planta desaladora de la que se han tomado los datos de operación para la parte experimental de este trabajo de tesis. Pretratamiento realizado. Características operacionales. etc.

4) Exposición de la evolución, durante cinco años de operación continua de la planta anterior. Toma de datos. Procesamiento y normalización de los mismos.

5) A partir de los soportes teóricos y prácticos anteriores, aplicar un modelo de diseño, que permita adaptar los fundamentos teóricos a la realidad práctica, de una forma operativa sencilla.

6) Correlación entre el modelo de diseño seguido y los datos prácticos obtenidos.

Finalmente, es preciso indicar que parte del soporte experimental de este trabajo de tesis ha sido expuesto en un congreso mundial de desalación promovido por el IDA (International Desalination Association), Kuwait (1.989) y publicado en el proceeding de dicho congreso y en la revista Desalination.

Todo lo anterior esta desglosado a través de un conjunto de capítulos adaptados a los objetivos, de tal forma que ilustrando cada uno de ellos, con convenientes ejemplos prácticos aclaratorios y aportando los suficientes conocimientos ingenieriles, se consigan

finalmente los objetivos expuestos.

Aunque el trabajo, como ya se ha mencionado, se aplicará al diseño de plantas de desalación de aguas salobres por OI, equipadas con membranas de poliamida del tipo TFC (Concretamente el modelo FT-30, fabricado por Filmtec (Dow Chemical Company)), en módulos de arrollamiento en espiral. Se procurará que pueda servir de base para posteriores estudios y ampliaciones a otros tipos de membranas y configuraciones modulares, y a otras aplicaciones de la OI.

CAPITULO II: ANTECEDENTES HISTÓRICOS

2.1.- Antecedentes históricos.

2.1.- Antecedentes históricos.

El proceso de osmosis inversa (OI), fue desarrollado en competencia directa con otros procesos, principalmente, con los de destilación y, fundamentalmente, para aplicaciones de desalación.

Su atractivo inicial radicó en el hecho de que la OI no requiere calor, solamente energía mecánica, pudiendo operar a temperatura ambiente.

Así como los procesos de destilación precisan que el agua salina a tratar, sea previamente calentada hasta una temperatura que, en función del tipo de proceso, está comprendida en el rango de 50-100°C, y mediante los efectos simultáneos de la presión y la temperatura es vaporizada, condensándose posteriormente para obtener el producto final (agua desalada o desalinizada). La OI opera con bajos requerimientos energéticos, ya que toda la energía necesaria de aportación al fluido, es en forma de energía de presión y cinética (bombeo), permaneciendo el mismo, durante todo el proceso, en una sola fase (líquida).

El conocimiento de los fenómenos osmóticos data desde hace más de 200 años. Incluso mucho antes, de acuerdo a Dickey **(1)**, la filtración a través de telas fue mencionada por Aristóteles, descubriéndose ciertas descripciones de dichos fenómenos a través de antiguos escritos chinos y en viejos pergaminos hebreos.

Sin embargo fueron las observaciones de Abbé Nollet, hacia la mitad del siglo XVIII (1748), las que aportando un cierto conocimiento de tales fenómenos, describiendo experimentos sobre difusión a través de membranas animales, promovieron a Traube, más de 100 años después (1867), a realizar experimentos sucesivos de rendimiento, con membranas preparadas artificialmente para diálisis, ultrafiltración (UF) y OI. Estos experimentos permitieron vislumbrar la capacidad potencial de fabricar filtros membranosos capaces de separar partículas coloidales de líquidos, e incluso solutos de bajo peso molecular disueltos en estos **(2)**.

La moderna filtración por membranas, tuvo sus principios en el pasado siglo, con Zsigmondy en Alemania. Membranas asimétricas fueron realizadas en los años treinta, en Alemania e Inglaterra, para aplicaciones específicas de ultrafiltración y microfiltración (MF) en industrias, a pequeña escala, pero viables. Estas membranas fueron desarrolladas como técnicas de separación, para su aplicación en laboratorios, y para concentración-purificación de agentes biológicos. El primer trabajo científico publicado sobre OI data de 1930.

Aquellos primeros investigadores encontraron que, cuando soluciones de sales diluidas en agua eran forzadas a través de ciertas membranas, el líquido obtenido a través de la membrana (permeado) era menos concentrado que la solución de aporte (alimentación). Sin embargo, este primer trabajo estuvo largamente parado, quedando el proceso de OI en espera de otra generación.

Precisamente a partir de 1950, el profesor Reid y sus estudiantes de la Universidad de Florida, en Estados Unidos, preconizaron que la separación de sales a través de membranas, podría ser aplicada para desalación de aguas. Fue entonces cuando comenzaron, realmente, los trabajos analíticos y experimentales sobre la OI, con rigor científico.

En 1953, la Office of Saline Water (OSW) de Estados Unidos, dio soporte económico a la investigación de la tecnología de OI, para empleo de membranas semipermeables en aplicaciones de desalación, creándose grupos de investigación en la Universidad de Florida (conducidos por Reid) **(3)** y en la de California (conducidos por Loeb y Sourirajan) **(4)**.

Así en 1958, se obtuvo un significativo adelanto en la aplicación práctica de la OI, cuando C.E. Reid y E.J. Breton, Jr. demostraron que podían obtenerse, bajo presiones de alimentación relativamente altas, modestos flujos y rechazo de sales, con membranas de acetato de celulosa. Estas investigaciones mostraron que el acetato de celulosa (AC) poseía características de permeabilidad y rechazo de sales, que podrían hacerlo atractivo para su uso en la fabricación de membranas para desalación **(5)**.

En 1960, el trabajo del grupo de S. Loeb y S. Sourirajan, en la Universidad de California, Los Ángeles (USA) **(6)**, desarrolló una técnica de revestimiento de membranas asimétricas de acetato de celulosa, que condujo a la obtención de flujos del orden de 15-30 lt/h por m² de superficie de membrana con rechazo de sales del 95%, bajo presiones efectivas de 40-60 Kg/cm². Esto representó un avance significativo de la tecnología, y fue el fundamento para ultimar el desarrollo de sistemas prácticos de desalación por el proceso de OI, ya que hasta que no se consiguieron estos niveles de flujo y rechazo, la OI no comenzó a competir con otros métodos de desalación ya establecidos comercialmente. El trabajo de Loeb y Sourirajan, proporcionó el desarrollo de la primera membrana comercialmente atractiva. Estas nuevas membranas incorporaron una fina y a la vez densa capa de revestimiento, situada sobre una estructura soporte más porosa. Esta construcción asimétrica pasó a ser entonces, la forma más deseable para la optimización tanto del flujo, como del rechazo de sales **(7) (8)**.

El proceso fue comercialmente utilizable para desalación de aguas salobres, hacia la mitad de los años sesenta, y para desalación de agua de mar a partir de 1974.

Durante los años sesenta, empresas USA, como la Gulf Environmental Systems, General Atomic, Aerojet General y otras, obtuvieron soporte económico de la Office of Saline Water (OSW), U.S.A., para la fabricación de membranas, módulos y sistemas de OI. Durante este periodo de tiempo, 1960-70, se estima que más de diez millones de dólares del gobierno USA, de aquella época, fueron usados para el desarrollo de la tecnología de OI **(9)**.

A mediados de los sesenta, fueron empleadas a nivel comercial las configuraciones modulares de los tipos plana y tubular (1964), mientras que la configuración en espiral, lo fue en 1967, todas ellas en acetato de celulosa (AC). A principios de los setenta, se utilizaron las primeras membranas de poliamida (PA), en configuraciones del tipo de fibra hueca, con las que se consiguió maximizar la cantidad de superficie de membrana por volumen de empaquetado. A mediados de los setenta, John Cadotte y otros colaboradores del North Star Research Institute, en Minneapolis, Minnesota, U.S.A. **(10)**, descubrieron como hacer mas efectivas las membranas de

poliamida multicapa, posteriormente conocidas como membranas compuestas de capa fina, TFC (Thin Film Composite), que suplantarían a las primeras membranas de AC en la configuración de arrollamiento en espiral. Desde sus comienzos, las configuraciones modulares espiral y fibra hueca, han sido las más usadas en aplicaciones de desalación de aguas salinas.

Las primeras plantas de desalación de agua de mar por OI, fueron contratadas a finales de los años setenta. A partir de entonces, el nivel de crecimiento, en número y capacidad de estas, tanto para aguas salobres, como para agua de mar, ha sido espectacular. En Diciembre de 1984, según El Ramly, N.A. **(11)**, más del 20% de la capacidad mundial instalada era por este procedimiento, lo que equivalía a 1.982.522 m³/día, de los que aproximadamente 1,85 millones de m³/día correspondían a sistemas de OI para desalación de aguas salobres.

En los 13 años siguientes, el porcentaje de OI pasó a ser el doble, ya que de acuerdo a Wangnick K. **(12)**, a finales de 1997 la capacidad mundial instalada era de 20,3 millones de m³/día, de los que el 54% correspondían a procesos de destilación y el 46% restante a procesos de membranas (40% ósmosis inversa y 6% electrodiálisis).

Y según el inventariado bianual desarrollado por el IDA (International Desalination Association) **(13) (14)**, la evolución en los 4 años siguientes fue:

La capacidad total instalada pasó a ser de 25.900.000 m³/día en Diciembre de 1999, de los que el 43% correspondían a OI, a 32.400.000 m³/día a finales del 2001, de los que 15.230.000 eran por tecnología OI (47%), de los cuales aproximadamente el 39% (5.880.000 m³/día) corresponden a desalación de aguas salobres.

España obtiene agua a través de desaladoras desde hace más de 30 años, siendo un país puntero en el desarrollo de tecnologías de desalación, y el quinto con mayor número de desaladoras del mundo.

La puesta en marcha de grandes desaladoras no se ha detenido desde que a mediados de los años 60 se hiciese la primera en la isla de Lanzarote.

En España en los últimos años se han realizado grandes inversiones en plantas de ósmosis inversa. En este sentido, uno de los logros más importantes que ha favorecido tal desarrollo, fue conseguir la normalización de las membranas, favoreciéndose la competencia y la bajada de precios de la tecnología y del agua producida.

De acuerdo al inventario del IDA, de noviembre de 2008, el 88% de las plantas instaladas en España son por la tecnología de OI. Correspondiendo el 64% a desalación de agua de mar y el 22% a agua salobre. El 81% de la capacidad instalada tiene como destino el consumo municipal, el 11% está destinado a riegos, y el 8% restante a usos industriales y otros.

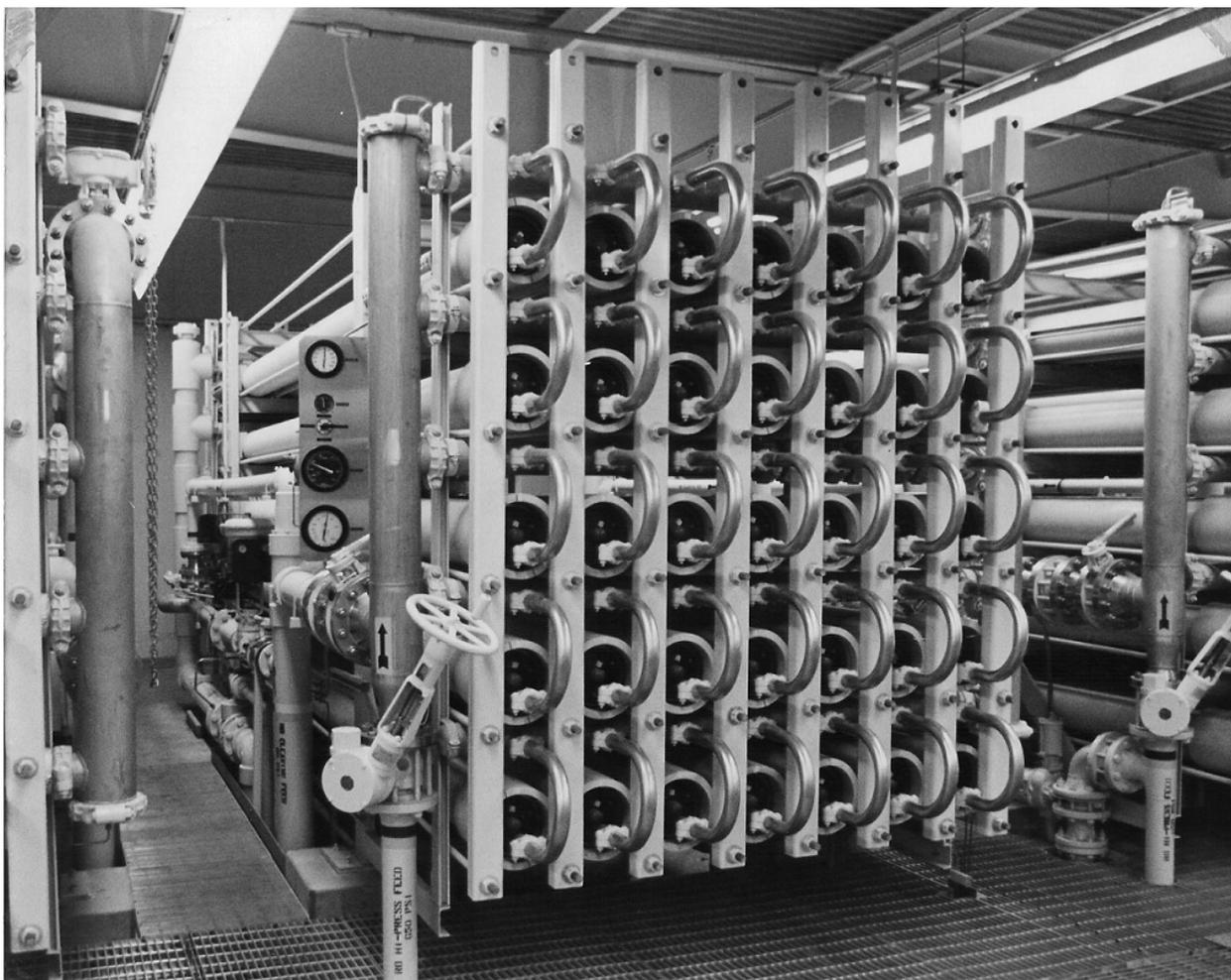


FIGURA F-II/1: PLANTA DE DESALACIÓN POR OI

Entre las primeras y más significativas plantas de desalación por OI podemos citar las siguientes:

Planta desaladora de agua salobre del Orange County Water District (OCWD), situada en la Water Factory 21, en Orange County, California, USA, que lleva tratando aguas residuales municipales desde 1.976, con una capacidad de producción de 20.000 m³/día y como tratamiento posterior al de depuración. El agua producto obtenida se mezcla con 40.000 m³/día de agua salobre subterránea, para obtener 60.000 m³/día de agua que posteriormente se inyecta en una serie de 23 pozos costeros con objeto de servir de barrera anti-intrusión marina y así preservar las características del agua subterránea de la zona.

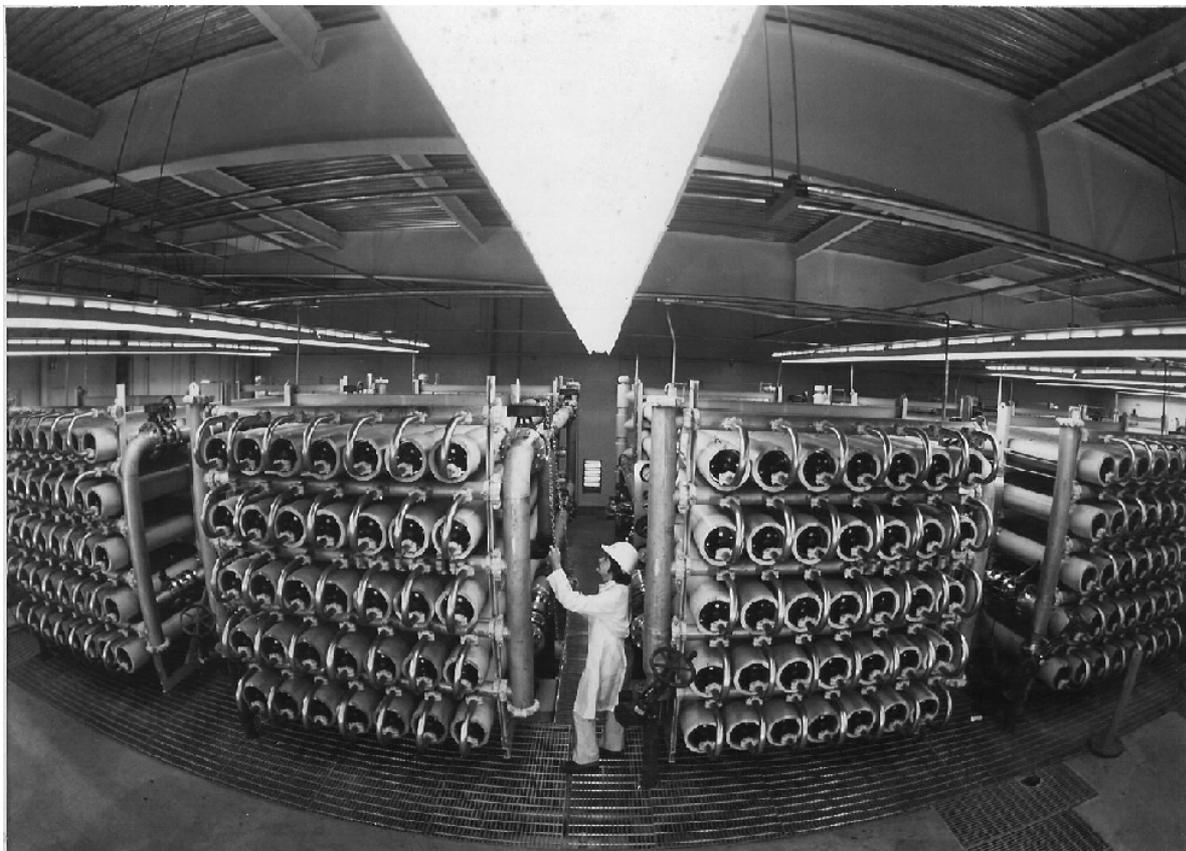


FIGURA F-II/2

Planta de Jeddha, Arabia Saudita, construida en 1.977. Que con una capacidad de 12.000 m³/día, constituyó la primera planta desaladora de agua de mar por OI a gran escala.

Planta de Malta, localizada en Ghar-Lapsi (Malta), construida en 1.983 para una capacidad de producción de 20.000 m³/día de agua potable de menos de 500 mg/l de salinidad, STD (Sólidos Totales Disueltos), a partir de agua de mar de 38.900 mg/l de STD. Constituyó, en su momento, la planta construida de mayor capacidad, operada mediante el sistema de OI.

En 1.986 fue adjudicada la desaladora Las Palmas III, situada en Las Palmas de G.C., islas Canarias, España. Con una capacidad inicial de 36.000 m³/día, posteriormente ampliada a 40.000 m³/día. Siendo su capacidad actual de

aproximadamente el doble de la inicial. Fue la mayor planta de desalación de agua de mar construida en España, y la primera de gran capacidad contratada con tecnología de ósmosis inversa para agua de mar.

En febrero de 2006 entró en funcionamiento en Israel la mayor desaladora del mundo. Se encuentra situada en la ciudad de Ashkelon y está diseñada para producir 330.000 m³/día de agua desalada, mediante 32 módulos de ósmosis inversa, suficiente para atender una población de 1.400.000 habitantes.

La OI es por tanto, una tecnología en auge. Aun cuando su utilización más frecuente es la desalación de aguas, su campo de aplicación se ha diversificado enormemente en los últimos años.

Trabajos de investigación adicionales sobre membranas y configuraciones modulares, se han desarrollado para explorar el potencial de la OI en otras aplicaciones. Actualmente existen comercializados módulos e instaladas plantas de tratamiento por OI, que operan en diversos campos diferentes al de desalación.

Hasta ahora, han sido estudiadas una gran variedad de aplicaciones del proceso de osmosis inversa, pero solo una serie de ellas han tenido un desarrollo comercial significativo, entre las que podemos citar:

- Producción de agua potable, a partir de aguas salobres o de mar:

Muchos municipios están establecidos en áreas carentes de agua de calidad, cuyo único recurso para suministro a la población, es agua salobre o de mar. La OI está siendo usada, en muchos de estos casos, para desalación y producción de agua potable.

Actualmente el avance en la tecnología, ha permitido el tratamiento de aguas salobres de hasta 15.000 ppm de sólidos totales disueltos, para obtener económicamente y sin mayores problemas, un producto de calidad. E incluso la desalación de agua de mar por OI, a un solo paso, es hoy una realidad de uso general. Cuando la fuente de

suministro del agua a tratar es un pozo, el ensuciamiento de las membranas es mínimo y el rendimiento de la OI es muy bueno.

En estos casos, el concentrado final, residuo o rechazo de la planta, normalmente, se transfiere al mar.

- Producción de agua para diversos procesos industriales:

La calidad del agua de suministro municipal, es frecuentemente inadecuada para ciertos procesos industriales o comerciales. La OI tiene una alta aceptación y de hecho se ha ampliado considerablemente su aplicación, para cubrir estos suministros, en los que la alta calidad del agua es esencial.

Así pe., la OI se usa bien por sí sola, o bien como etapa previa al tratamiento por desionizadores, para eliminar virtualmente todas las sales disueltas del producto final. En este sentido, son frecuentes sus aplicaciones para suministro de agua de alta calidad a industrias farmacéuticas, químicas, biológicas, alimentarias, así como en centrales eléctricas y generadores de vapor, en las que la salinidad y/o la dureza del agua de suministro pueden producir problemas de corrosión y/o incrustación en tuberías y calderas.

- Tratamiento de efluentes residuales:

La OI tiene un gran potencial de aplicación en el campo del desarrollo y mejora del medio ambiente, ya que puede ser usada para control de la polución y, bajo circunstancias favorables, para recuperar productos a partir de los efluentes.

Algunas aplicaciones específicas incluyen el tratamiento del agua de lavado de la electroplastia, para recuperación de metales, en las cuales, además, el agua tratada es adecuada para su reuso. La eliminación de sales y partículas metálicas del agua procedente de la purga de las torres de refrigeración, es otra de sus aplicaciones en este sentido, así como la purificación de los efluentes de las industrias de la pulpa y el papel.

Especial mención merece su uso como tratamiento final en estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDAR), para su reuso en aplicaciones especiales, como cultivo de plantas ornamentales, etc. Dentro de este apartado puede indicarse también, la aplicación de la OI en sistemas de tratamiento de efluentes para descarga "cero", dentro del conjunto clarificación, filtración, osmosis inversa y evaporación final, con los que puede conseguirse un reciclado de casi el 100%, y mediante la evaporación final producir sal seca.

- Tratamientos de diversos procesados de la industria de la alimentación:

Desde hace años, la OI se ha empleado en aplicaciones de concentración de alimentos, en las que el proceso está siendo usado para deshidratar parcialmente los alimentos, en lugar de la tradicional deshidratación por evaporación a alta o media temperatura. En estos casos, las ventajas de la OI son triples: más bajos requerimientos energéticos, no existen peligros por manejo o estropeo de los alimentos con altas temperaturas (en algunos casos, incluso se consigue una mejor retención del sabor y olor), y un más bajo costo de capital, particularmente en las operaciones más pequeñas.

Sin embargo, conviene tener presente, a la hora de elegir el tipo de membrana y la configuración adecuada, las tres limitaciones fundamentales que existen al uso de la OI en el procesado de alimentos:

- * Muchos alimentos tienen muy altas presiones osmóticas, requiriendo altas presiones para su deshidratación.
- * Las membranas se ensucian rápidamente por los constituyentes de casi todos los alimentos. Y no en todos los casos pueden emplearse métodos de limpieza efectivos.
- * En muchos casos, las membranas deben operar a temperaturas perjudiciales.

Dentro de los procesos de concentración, la OI se aplica en industrias alimentarias tales como lecheras, cerveceras, jugos y concentrados, vinos, etc.

El comienzo de la desalación de aguas por OI, en la región canaria, a nivel industrial, tiene lugar a partir del año 1978, con la instalación de las primeras plantas, para desalación de aguas salobres, situadas fundamentalmente en la isla de Fuerteventura. Estas pequeñas plantas con capacidades comprendidas entre 20 y 80 m³/día, trataban aguas con un amplio rango de salinidad (desde 4.000 a 15.000 ppm de STD) y el destino del agua producto era, casi exclusivamente, para riegos agrícolas.



FIGURA F-II/3: DESALADORA DE AGUA SALOBRE POR OI DE 25 m³/día

Fue a partir del siguiente año, 1979, cuando realmente se produce un avance significativo de este procedimiento de desalación, con la instalación en la finca de Los Moriscos (Gran Canaria), de una planta desaladora de agua salobre por esta tecnología y con capacidad de 200 m³/día. Esta desaladora trataba un agua de alimentación, procedente de pozo, con una salinidad aproximada de 6.000 mg/l de STD, y el destino final del agua producto eran las instalaciones agrícolas experimentales que el Servicio Agrícola de la Caja Insular de Ahorros poseía en dicha finca.



FIGURA F-II/4: PLANTA DESALADORA DE LOS MORISCOS

En los 3 años siguientes se instalaron 12 plantas desaladoras de agua salobre por OI, todas en la isla de Fuerteventura, de las que 8 de ellas tenían una capacidad superior a los 100 m³/día, y cuya agua producto tenía como destino final, riegos agrícolas.

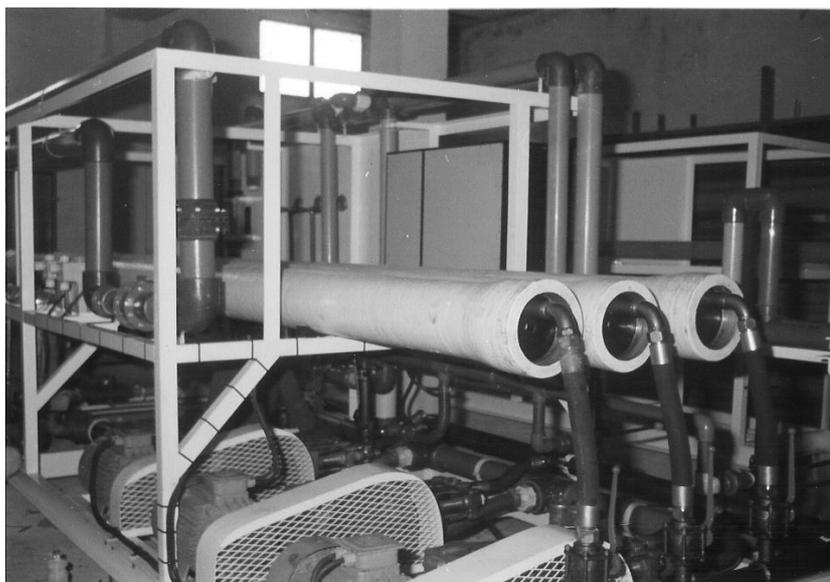


FIGURA F-II/5: DESALADORA DE 300 m³/día EN FUERTEVENTURA

Desde estos comienzos, hasta ahora, la expansión de la tecnología de OI, aplicada a la desalación de aguas, se ha producido de un modo acelerado, con un gran número de plantas de tratamiento de aguas salobres, instaladas y con varios años de operación en las islas de Gran Canaria, Fuerteventura y sur de Tenerife.



FIGURA F-II/6: DESALADORA POR OI DE 100 m³/día

Esta expansión se acrecentó notablemente, a partir de 1986, fecha de adjudicación para la ciudad de Las Palmas, de la desaladora Las Palmas III, de la que ya hemos hecho referencia, con la instalación de grandes plantas desaladoras de agua de mar por el mismo procedimiento y para aplicaciones de potabilización, principalmente en las costas de Gran Canaria, Lanzarote y Fuerteventura.

En el año 2006, para una producción diaria de 588.000 m³, 328 plantas desaladoras estaban instaladas en la región canaria, de las que 135 estaban localizadas en la isla de Gran Canaria, 80 en Lanzarote, 64 en Fuerteventura, 44 en Tenerife, 4 en la isla del Hierro y 1 en la Gomera. Y de estas, el 89% (291) empleaban la tecnología de OI.

A continuación se muestran desaladoras por el sistema de OI, para tratamiento de aguas salobres con fines agrícolas y capacidades respectivas de 250, 500 y 1.200 m³/día (Figuras F-II/7, 8 y 9).



FIGURA F-II/7



FIGURA F-II/8



FIGURA F-II/9

Por lo que se refiere a los tipos de aguas manejados en desalación, agua de mar, salobres, potable, etc. Tomaremos como base para su definición o aplicación, el criterio del IDA, según el cual:

TIPO DE AGUA	SALES TOTALES DISUELTAS (mg/l)
POTABLE	< 500
SALOBRE DE BAJA CONCENTRACION	500 < STD < 5.000
SALOBRE DE CONCENTRACION MEDIA	5.000 < STD < 15.000
SALOBRE DE ALTA CONCENTRACION	15.000 < STD < 35.000
DE MAR	35.000 < STD < 50.000
SALMUERA	50.000 < STD
RESIDUAL	Procedente de núcleos urbanos o de industrias

El siguiente diagrama corresponde a la aplicación de los procesos de desalación, de acuerdo al contenido en sólidos totales disueltos del agua bruta a tratar:

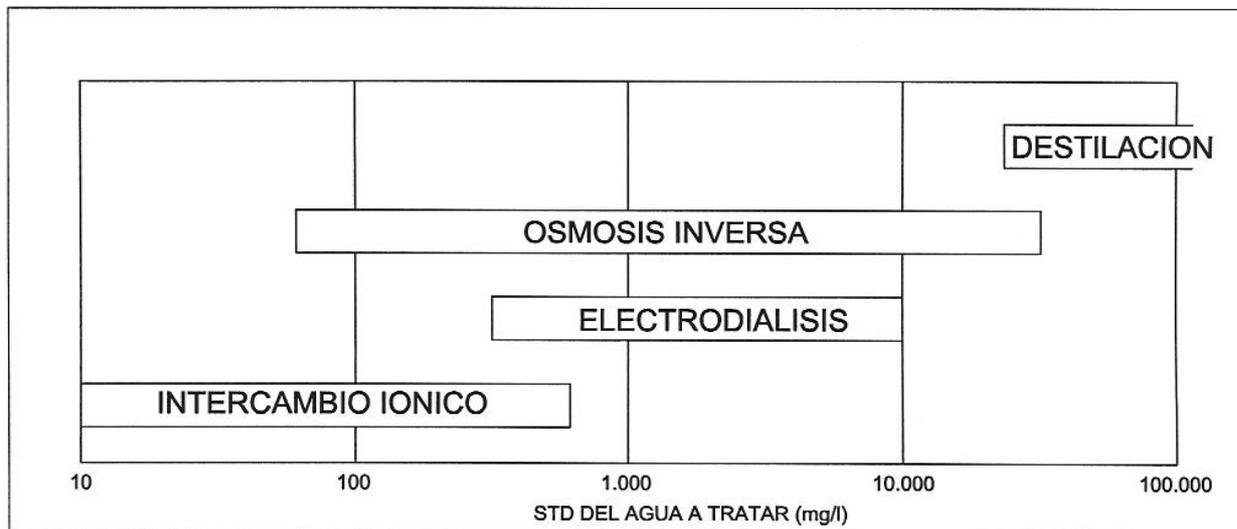


FIGURA F-II/10

LISTA DE SIMBOLOS

AC	= Acetato de celulosa.
IDA	= International Desalination Association.
MF	= Microfiltración.
OCWD	= Orange County Water District.
OI	= Osmosis Inversa.
OSW	= Office of Saline Water.
PA	= Poliamida.
STD	= Sólidos Totales Disueltos.
TFC	= Thin Film Composite.
UF	= Ultrafiltración.

REFERENCIAS

- (1) Dickey, G. B., "Filtration." *Van Nostrand-Reinhold*, Princeton, New Jersey. (1961).
- (2) Ferry, J. D., *Chem. Rev.* 18, 373. (1936).
- (3) Breton, E. J., OSW 16.
- (4) Yuster, T. R., S. Sourirajan, and K. Bernstein. Univ. California (Los Angeles). Dept. Eng. Rept. 7, 58-26. (1958).
- (5) Reid, C. E., and E. J. Breton, *J. Appl. Polym. Sci.* 1, 133 (1959). *Chem. Eng. Progr. Symp. Ser.* 55(24), 171. (1959).
- (6) Loeb, S., and S. Sourirajan. University of California at Los Angeles, USA. Dept. Eng. Rept. No. 60-60. (1960).
- (7) Loeb, S., and S. Sourirajan. *Advan. Chem. Ser. No.* 38, pp. 117-132. (1962).
- (8) S. Sourirajan and T.S. Govindan. *Proceedings of the First International Symposium on Water Desalination*, Washington, D.C., Vol. 1, pp. 251-274. (1965)
- (9) Outline of Development of Reverse Osmosis. *Reverse Osmosis Principles and Applications*. Roga Systems Division of Gulf Environmental Systems Company. October 1970.
- (10) Nonpolysaccharide Membranes for Reverse Osmosis: NS-100 Membranes, L.T.Rozelle, J.E.Cadotte, K.E.Cobian and C.V.Koop,Jr. Contract No. 14-30-2883 U.S. Department of the Interior (OSW). *Reverse Osmosis and Synthetic Membranes*, Ed. S. Sourirajan, pp. 249-261. (1977).
- (11) El Ramly, N.A. *Desalting Plants Inventory*, Report 8, WSIA. (1985).
- (12) Wangnick, Klaus. *1998 IDA Worldwide Desalting Plants Inventory*. Report No. 14. (1998).
- (13) Wangnick, Klaus. *2000 IDA Worldwide Desalting Plants Inventory*. Report No. 16. (2000).
- (14) Wangnick, Klaus. *2002 IDA Worldwide Desalting Plants Inventory*. Report No. 17. (2002).

CAPITULO III: DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS Y COMPONENTES DE UNA PLANTA

3.1.- Conceptos generales. Terminología.

3.1.1.- El proceso de osmosis inversa.

3.1.2.- Sistemas componentes. Definiciones.

3.2.- Membranas.

3.3.- Bombas.

3.4.- Pretratamientos.

3.5.- Postratamientos.

3.6.- Aditivos.

3.7.- Restauración del rendimiento. Equipo de limpieza.

3.8.- Puesta en operación de plantas de OI.

Textos consultados.

Con independencia de las referencias que en su momento se citen. En general, para la realización de los distintos apartados de este capítulo, los siguientes textos han sido consultados:

- I. *REVERSE OSMOSIS AND SYNTHETIC MEMBRANES.* E. S. Sourirajan. 1977.
- II. *REVERSE OSMOSIS TECHNICAL MANUAL.* Office of Water Research and Technology (OWRT). 1979.
- III. *REVERSE OSMOSIS PRINCIPLES AND APLICATIONS.* Fluid Systems Division. UOP Inc. 1970.
- IV. *PERMASEP ENGINEERING MANUAL.* E. Du Pont de Nemours & Co. 1982.
- V. *FILMTEC MEMBRANES TECHNICAL MANUAL.* Filmtec Corporation. Dow Chemical Co. 1995.

3.1.- Conceptos generales. Terminología.

3.1.1.- El proceso de osmosis inversa.

El fenómeno de la ósmosis, presente en la naturaleza, puede ser definido como el paso espontáneo de un líquido (agua), desde una solución diluida hacia una más concentrada, a través de una membrana semipermeable que presenta la particularidad de ser permeable al agua (disolvente), pero no a la práctica totalidad de los sólidos disueltos (soluto) (Figura F-III/1).

La transferencia de agua, desde un lado al otro de la membrana, continúa hasta que las concentraciones de las soluciones, a ambos lados de la membrana, se igualan. De esta forma se ha producido una elevación de la columna de líquido por el lado de la membrana correspondiente a la solución inicialmente más concentrada, hasta que la altura de contrapresión haya sido tal que impide cualquier transferencia neta de disolvente hacia el lado de la solución inicialmente más concentrada.

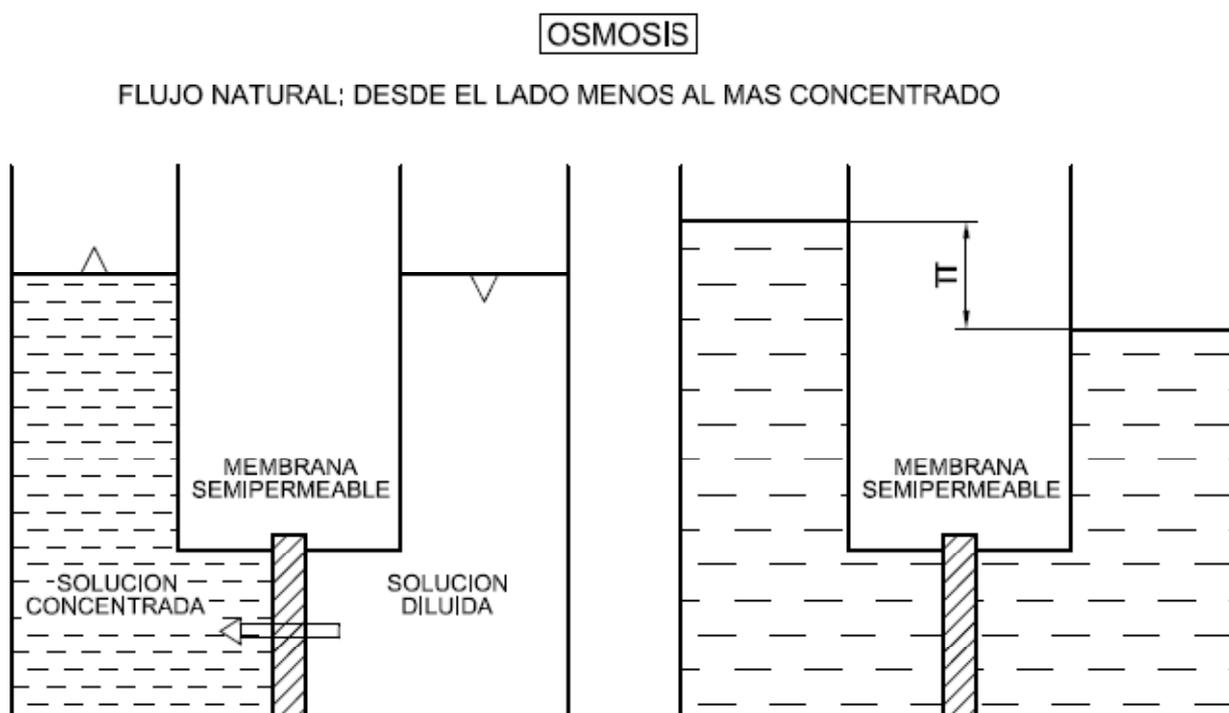


FIGURA F-III/1

Esta contrapresión de equilibrio final π , medible en columna de líquido de solución final, recibe el nombre de presión osmótica de la solución final (diferencia entre las presiones osmóticas, de las soluciones inicialmente existentes a ambos lados de la membrana) y es por tanto la que impide que continúe la transferencia de disolvente.

Si en las condiciones iniciales, se dispone a un lado de la membrana agua pura (solo disolvente), y en el otro agua salina (solución concentrada), y en estas condiciones se sitúa un pistón sobre el lado de la membrana, correspondiente a la solución concentrada, y se aplicase sobre él una presión P , tendría lugar alguna de las tres posibilidades siguientes:

1ª) Si $P < \pi$ (presión osmótica de la solución concentrada), el disolvente (agua) fluirá espontáneamente hacia la solución concentrada. Estableciéndose un desnivel que correspondería al valor de $\pi - P$. En este caso, aún cuando las concentraciones a ambos lados de la membrana, continúan siendo diferentes, la concentración de sales por el lado del disolvente continua siendo nula, mientras que por el otro lado, la solución se ha vuelto menos concentrada.

2ª) Si $P = \pi$, la presión inicial iguala a la "contrapresión" osmótica, e impedirá desnivel alguno, entre ambos lados de la membrana, por tanto no se producirá desplazamiento de disolvente a través de la membrana y la solución concentrada no cambiará su composición.

3ª) Si $P > \pi$, al superar la presión inicial a la presión osmótica de la solución concentrada, se producirá flujo de disolvente (agua), en sentido inverso, se decir desde el lado de la membrana correspondiente a la solución concentrada, hacia el lado del agua pura. Se incrementará el volumen de disolvente (agua) por un lado, mientras que por el otro, se reducirá el correspondiente a la solución concentrada, por lo que aumentará la concentración en esta. Este flujo de agua "desalada" continuará hasta que los sucesivos incrementos de la presión osmótica de la solución concentrada

hayan contrarrestado la presión de aporte, esto es, hasta que la concentración de la solución alcance un nivel, tal que su presión osmótica: $\pi_f = \pi + (P - \pi) = P$.

Esta última posibilidad es la que constituye el proceso de "osmosis inversa" (Figura F-III/2).

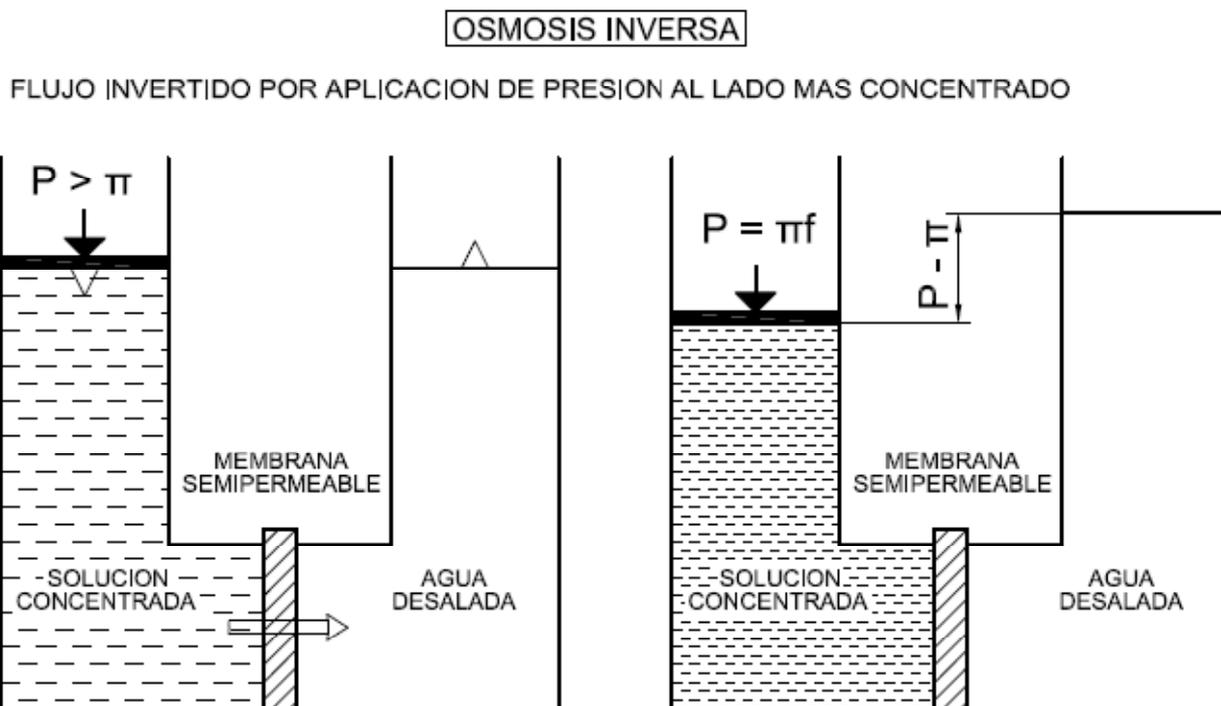


FIGURA F-III/2

Por lo tanto, en el proceso de OI, el agua fluye selectivamente, a través de una membrana semipermeable polimérica, desde una solución concentrada, hacia otra teórica e idealmente "desalinizada".

A partir de aquí, resulta conveniente precisar la diferencia entre los términos, ya mencionados y que caracterizan la calidad de un agua, "desalada" y "desalinizada", vulgarmente confundidos, pero que en el campo del tratamiento de aguas, tienen diferentes significados. Así, debido a que el comportamiento real de la membrana permite un mínimo paso de sales (oscila aproximadamente entre un 0,1 y un 10% de la concentración de sales en la solución de alimentación, en función del tipo de sal y de

membrana), digamos que la membrana es permeable al agua y relativamente impermeable a las sales, por lo que el producto final o agua desalada, no estará "desalinizada", o lo que es lo mismo, desmineralizada (ultrapura).

El proceso de OI se basa pues en el conocimiento de la presión osmótica de la solución a desalar, que se analiza con más detalle en posteriores capítulos, y que puede considerarse en principio y de un modo aproximado, directamente proporcional a la concentración de soluto.

Así para un agua de mar típica de 35.000 mg/l de STD, cuya presión osmótica oscila en torno a las 25 atm, salvo defectos en la membrana que puedan dar lugar a corrientes de fuga a su través, el agua solo comenzará a fluir a través de la misma, cuando se consiga alcanzar sobre la superficie "activa" de la membrana y por el lado correspondiente a la solución concentrada, esa mínima presión. Debido al proceso de salinización de la solución concentrada, con objeto de mantener un mínimo de flujo, para lograr un rendimiento aceptable, en la práctica se requerirán presiones del orden de 2 a 3 veces la presión osmótica inicial (50-75 atm.), operando en un rango de recuperación, tal como se observa en el siguiente apartado, del 30-45%, normalmente utilizado para desalación de agua de mar por OI.

3.1.2.- Sistemas componentes. Definiciones.

Una planta de desalación de aguas en general, se compone esencialmente de tres sistemas: Pretratamiento, Tratamiento y Postratamiento (*Figura F-III/3: Diagrama de Flujos*).

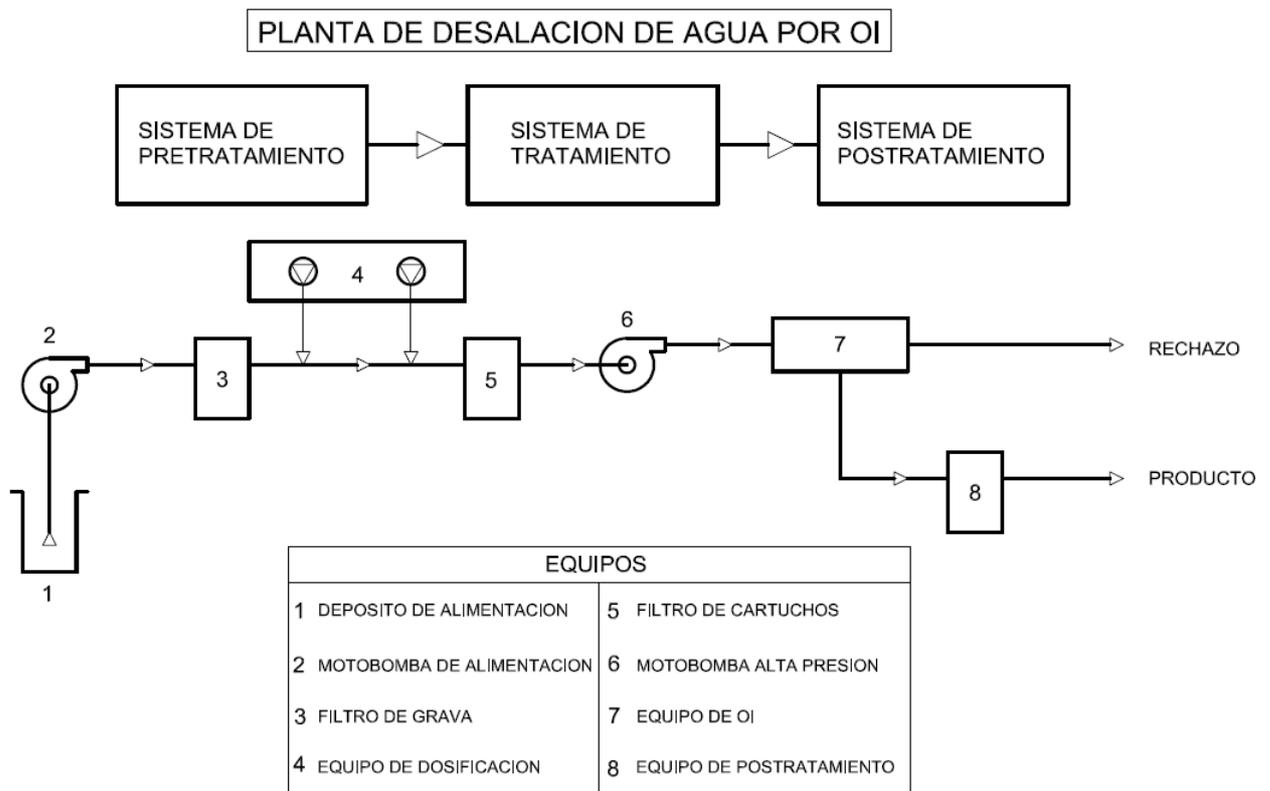


FIGURA F-III/3: DIAGRAMA DE FLUJOS

- SISTEMA DE PRETRATAMIENTO.

Es el componente de la planta destinado a recibir el agua a bruta a tratar, procedente de la fuente de suministro (pozo, depósito, etc.) y proporcionarle el tratamiento adecuado a las condiciones de operación del sistema de tratamiento o de desalación empleado.

Este sistema, en una planta de desalación de agua por OI, dispone de los siguientes equipos:

- ✚ Equipo de alimentación, constituido por una motobomba de impulsión a baja presión, encargada de captar el agua bruta a tratar del depósito de alimentación y hacerla pasar a través del equipo de filtración.

- ✚ Equipo de filtración, que dispone de dos tipos de filtros, grava y cartuchos. Su función es la de eliminar las partículas en suspensión que suele llevar el agua a tratar y que podrían dañar otros equipos de la planta.
- ✚ Equipo de dosificación de productos químicos, para acondicionar el agua a tratar y que dependerá de sus características, del tipo de membrana de OI utilizado y de las condiciones de operación de la planta.

- SISTEMA DE TRATAMIENTO.

Recibe el agua a tratar procedente de un pretratamiento previo, y tiene lugar en él la desalación propiamente dicha, a través del proceso utilizado en la planta.

Este sistema, en una planta de desalación de agua por OI, dispone de los siguientes equipos:

- ✚ Equipo de bombeo a alta presión, constituido por una motobomba que suministrará al agua bruta a tratar la presión necesaria para vencer la presión osmótica en las membranas.
- ✚ Equipo de OI, formado por las membranas de OI (el tipo y número de las mismas dependerá de las condiciones del agua a tratar y de los requerimientos estipulados para el agua desalada) dispuestas según módulos, que a su vez estarán alojados en el interior de contenedores o tubos de presión, donde se producirá el efecto de OI, y desde donde saldrá el agua según dos corrientes diferenciadas, una de ellas corresponderá al agua desalada o “producto”, y la otra al agua concentrada o “rechazo”.

- SISTEMA DE POSTRATAMIENTO.

Recibe el agua desalada, procedente del sistema de tratamiento, para aportarle los acondicionamientos necesarios, en función de su destino final (potabilización, riego

agrícolas, suministros a industrias, calderas, etc.).

Existen unos conceptos de uso generalizado, que afectan al sistema de tratamiento de una planta de desalación, y cuyos parámetros asociados caracterizan, por su valor, al tipo de proceso empleado, al sistema y por tanto, a la planta que los incluye:

.Alimentación.

Constituye la corriente de agua a desalar, que según sea el agua de aporte o de "alimentación" a la planta de desalación (suministro al sistema de pretratamiento), o bien el agua de entrada o de "alimentación" al sistema de tratamiento o de desalación, recibe los nombres de "agua bruta" y de "agua de alimentación", respectivamente. Por lo tanto, salvo derivaciones o entradas auxiliares, el agua de alimentación será el agua bruta pretratada.

.Producto.

Se trata de la corriente de agua desalada o producida por la planta en su sistema de tratamiento, en virtud del proceso de desalación aplicado.

.Rechazo.

Normalmente, no toda la corriente de alimentación es transformada en producto, por el proceso de desalación, sino que un cierto caudal de la primera, una vez procesado en el sistema de tratamiento, es descargado por la planta como corriente de salmuera residual "desaprovechada", que recibe el nombre de concentrado o agua de rechazo.

.Etapas de desalación.

El sistema de tratamiento de la planta, dependiendo del tipo de proceso de desalación empleado, y en función de ciertos parámetros, como son pe., concentración de sales, valor del pH, temperatura, etc., tanto del agua de alimentación como del producto a obtener. Estará diseñado para aplicar el procedimiento de desalación, una sola vez o varias veces sucesivas, según etapas o subsistemas de desalación, siendo en este caso, la alimentación a cada una de ellas, el rechazo de la anterior, con la finalidad de disminuir en lo posible el volumen de la corriente de rechazo final, permitiendo con ello un mayor aprovechamiento del agua de alimentación. En el primer caso, se tratará de un sistema de tratamiento de una etapa de desalación, y en el segundo el sistema dispone de varias etapas de desalación.

.Pasos de desalación.

En muchos casos la calidad del producto no resulta adecuada al destino final del mismo. Siendo necesaria la aplicación de tratamientos de desalación posteriores al producto obtenido. En estos casos estaríamos hablando de pasos sucesivos de desalación. El agua de alimentación a cada uno de ellos sería el producto del paso anterior.

Los parámetros asociados a los conceptos anteriores, y cuyos valores caracterizan la planta (parámetros característicos), pueden englobarse en dos grupos, parámetros de flujo y parámetros de concentración (*Figura F-III/4*):

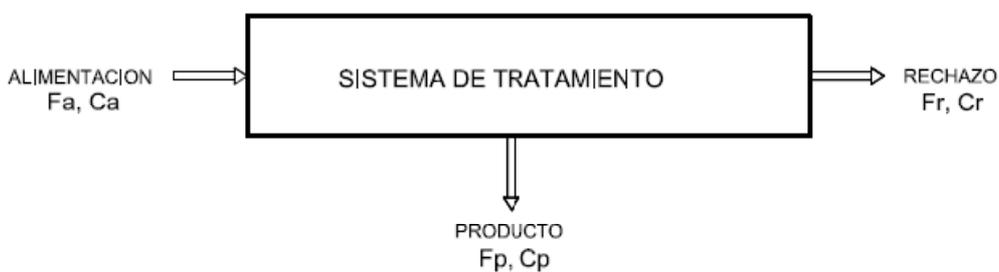


FIGURA F-III/4

PARAMETROS DE FLUJO:

Utilizados para indicar los caudales de las corrientes de alimentación, producto y rechazo del sistema de tratamiento de la planta de desalación:

.Flujo de alimentación o de agua de alimentación (F_a).

.Flujo de producto o de agua producto (F_p). Cuyo valor constituye la producción de la planta.

.Flujo de rechazo o de agua de rechazo (F_r).

Los anteriores parámetros suelen expresarse, normalmente, en metros cúbicos por hora de operación continua (m^3/h) o metros cúbicos por cada 24 horas de operación continua ($m^3/día$).

.Recuperación o factor de conversión (R). Parámetro que relaciona los 3 anteriores, indicando el porcentaje de agua de alimentación que se transforma en agua producto. Esto es:

$$R(\%) = (F_p \cdot 100) / F_a \quad (Ec.1/3)$$

$$\text{Siendo } F_a = F_p + F_r \quad (Ec.2/3)$$

PARAMETROS DE CONCENTRACION:

Se emplean para indicar la concentración de soluto en las tres corrientes, alimentación, producto y rechazo:

.Concentración de la alimentación o del agua de alimentación (C_a).

.Concentración del producto o del agua producto (C_p).

.Concentración del rechazo o del agua de rechazo (C_r).

Las unidades de concentración, generalmente empleadas, suelen ser miligramos de soluto por litro de disolución (mg/l) o partes por millón (ppm).

.Rechazo de sales o del soluto presente en el agua de alimentación (R_s). Parámetro que relaciona los anteriores, indicando el porcentaje de soluto del agua de alimentación, que se ha eliminado en la transformación de la anterior en agua producto. Esto es:

$$R_s(\%) = (C_a - C_p)100/C_a \quad (\text{Ec.3/3})$$

Este es un parámetro de gran importancia, ya que da idea del grado de desalación del tipo de proceso utilizado en la planta.

.Paso de sales o del soluto presente en el agua de alimentación (P_s). Parámetro de significado similar al anterior, que indica el porcentaje de paso de soluto desde la solución de alimentación a la del producto, por la relación:

$$P_s(\%) = (C_p/C_a)100 = 100 - R_s(\%) \quad (\text{Ec.4/3})$$

.Polarización de la concentración (PC), relación entre la concentración de sales sobre la superficie de la membrana y la concentración media de sales en el grueso de la corriente de concentrado (diferentes por efecto de la capa límite adyacente a la superficie de la membrana, como queda ilustrado (*Figura F-III/5*). Parámetro asociado al proceso de desalación por osmosis inversa, del que aquí hacemos referencia, y que mas adelante se verá con mas detalle.

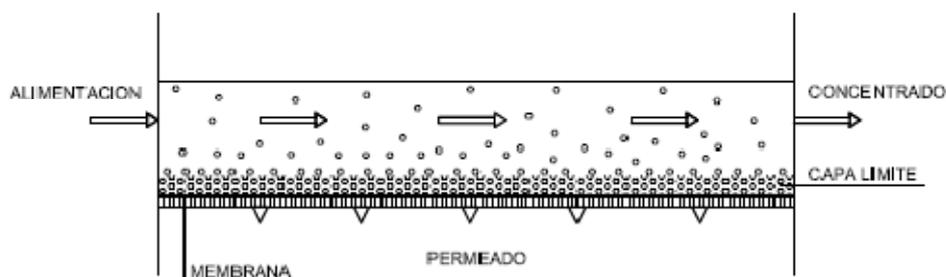


FIGURA F-III/5

3.2.- Membranas.

En el diseño del sistema de tratamiento por OI, para su aplicación real en una planta de desalación de aguas de bajo costo, se ha tropezado con muchas dificultades para la resolución de una serie de problemas ingenieriles que se plantean. Algunos de estos han sido:

- a) Diseñar una membrana semipermeable, de frágil estructura, para que sea capaz de soportar presiones de hasta 40 kg/cm^2 (aguas salobres) y 80 kg/cm^2 (agua de mar), con la que puedan obtenerse altos valores de producción por unidad de superficie y de rechazo de sales.
- b) Separar adecuadamente ambas caras o lados de la membrana, para evitar el contacto de la corriente de alimentación-rechazo (alta presión), con la corriente de producto (baja presión).
- c) Disponer de una considerable superficie de membrana por unidad de volumen del sistema (alta densidad de empaquetado), para reducir espacio y costes.
- d) Minimizar los efectos de la concentración de sólidos sobre la superficie de la membrana, particularmente el espesor de la capa límite (reducir la polarización de la concentración, PC), para evitar prematuros ensuciamientos, por medio de un adecuado diseño de los canales de paso de la corriente alimentación-rechazo.

e) Reducir al máximo las caídas de presión en los canales de paso de las corrientes, a fin de disponer a lo largo de la superficie de la membrana de la mayor presión efectiva posible.

f) Diseñar el sistema de forma modular que permita reducir los costos de reemplazamiento de membranas.

Con la finalidad de dar solución a los problemas expuestos, en función de las características del agua bruta a tratar y los requerimientos para el producto, se han creado diferentes tipos de membranas en distintas configuraciones y módulos, que se analizan en los siguientes apartados:

- Membranas semipermeables.

La membrana ideal para desalación de aguas por OI, consistiría de una película de material polimérico, libre de imperfecciones. Las propiedades de transporte del material elegido, deberían ser tales que permitiese el paso de agua a su través con el mínimo impedimento, a la vez que presentase una virtual barrera al paso de sales (permeable al agua e impermeable a las sales disueltas), para lo cual la membrana debe ser a la vez, extremadamente fina y fuerte.

Existe una serie de polímeros cuyo comportamiento se aproxima a este nivel ideal, ofreciendo diferentes grados de permeabilidad al agua (producción) y de "impermeabilidad" a las sales (rechazo). Ahora bien, debido a que los requerimientos de mínimo espesor y máxima fortaleza son incompatibles, esto ha llevado a incluir junto con el polímero base de la membrana, materiales que sirvan de soporte del anterior, tales como resinas de fibra de vidrio, cerámica porosa, papel de cáñamo y plásticos porosos.

- Configuraciones.

Existen tres tipos fundamentales de configuraciones adoptados para darles

forma a las membranas, de manera que permitan su empleo a nivel comercial en los distintos módulos de OI utilizados en la práctica. Estos tipos son la configuración en forma plana, tubular y fibra hueca.

- Tipos de membranas. Estructura y preparación.

En cuanto al polímero base de la membrana, las membranas admiten una primera clasificación según dos grupos generales, las celulósicas (AC), formadas de acetato de celulosa, ya sea en forma de diacetato o triacetato de celulosa, bien por sí mismos o formando mezclas, y las no celulósicas (PA), formadas por todas las no incluidas en el anterior grupo, y que comprenden desde las poliamidas aromáticas hasta las más recientes membranas compuestas de varios polímeros, denominadas compuestas o mixtas (comúnmente conocidas por el término anglosajón "composite"), que se analizan en los apartados siguientes:

A) Membranas tipo Loeb-Sourirajan (6).

Uno de los materiales más empleados en la fabricación de membranas, ha sido y continúa siéndolo, el acetato de celulosa, realizadas a partir de la técnica de preparación descubierta por Loeb y Sourirajan (Capítulo 2). Aquellas primeras membranas asimétricas de acetato de celulosa modificadas, tenían un espesor total aproximado de 100 μm , de los que unos 2000 Å (0,2 μm) correspondían a la capa activa, siendo el resto de la película una masa porosa relativamente esponjosa (aproximadamente unos 2/3 del peso de la membrana es agua).

La membrana de Loeb-Sourirajan fue preparada por medio de una técnica de moldeo, a partir de una solución del 15-20% en peso, de acetato de celulosa en un conjunto de disolventes formado por acetona, agua y perclorato de magnesio. La solución se fundió y moldeó en forma de película a una temperatura aproximada de 0°C, durante unos pocos minutos.

Una vez fundida la membrana, se sumergía en agua fría durante un corto periodo de tiempo (1 hora), para drenar o limpiar los restos de acetona y perclorato y facilitar la solidificación de la película.

En el lado de la membrana expuesto a la atmósfera, durante la etapa de fundición, se forma una densa capa muy fina (capa activa), mientras el resto de la misma, durante la etapa de inmersión en agua se transforma en una matriz porosa abierta, de manera que el agua y el acetato de celulosa forman una fase continua, no existiendo una línea clara de separación entre la capa activa y la parte porosa de la membrana, de forma que los poros se vuelven progresivamente más pequeños, a medida que se aproximan a la capa, donde se desvanecen o desaparecen casi por completo, y la membrana ofrece casi una perfecta continuidad. Hasta producirse la saturación, la membrana ha absorbido agua por capilaridad, hasta llegar al 60-70% de agua en peso de su constitución.

Finalizada esta etapa de inmersión o solidificación, las membranas ya son relativamente impermeables a compuestos orgánicos de alto peso molecular, aunque muestran escaso rechazo al cloruro sódico.

La semipermeabilidad de la membrana está marcadamente influenciada por la posterior etapa de "templado" o tratamiento por calor, que se realiza por inmersión en agua a una temperatura que oscila entre 60 y 90°C. Durante el proceso de temple, la temperatura y el tiempo de inmersión deben estar perfectamente controlados, ya que influyen profundamente tanto en el flujo de agua como en el rechazo de sales, así como en otras propiedades de la membrana, como compactación, hidrólisis, etc.

En general, a más alta temperatura de tratamiento, corresponderán mayores decrecimientos en la permeabilidad de la membrana, tanto al agua como a la sal (sube el rechazo y decrece el flujo). Normalmente se alcanza un buen tratamiento de temple cuando la permeabilidad al agua de la membrana, decrece en torno a un orden de magnitud, mientras que al cloruro sódico lo hace de 2 a 3 ordenes. De forma que el rechazo que ofrece a este pasa a ser, aproximadamente del 25 al 95% o más.

Las membranas formadas por el anterior procedimiento, son conocidas por varios nombres, entre ellos "Loeb-Sourirajan", "modificadas", "asimétricas", etc. y su polímero básico no está limitado al acetato de celulosa (AC), aunque es el más empleado en la práctica.

Esta técnica de preparación ha sido usada para la fabricación de membranas con configuración en las formas plana, tubular y fibra hueca.

En la figura se muestra una microfotografía electrónica de la sección transversal de una membrana tipo Loeb-Sourirajan de AC.

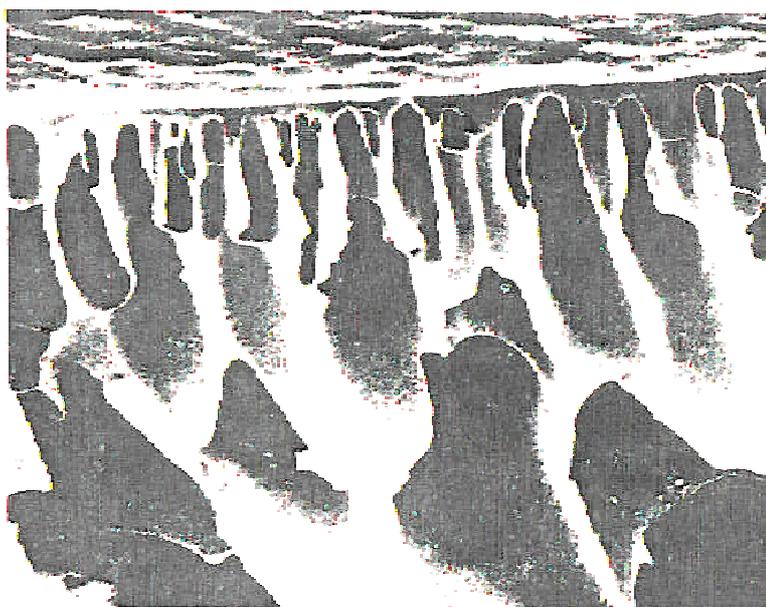


FIGURA F-III/6: SECCION TRANSVERSAL MEMBRANA LOEB-SOURIRAJAN

B) Membranas compuestas.

Representan un relativamente nuevo enfoque para la construcción efectiva de membranas extremadamente finas, de ahí el nombre con el que son conocidas TFC (Thin Film Composite).

Su concepción es como sigue:

En primer lugar se prepara, sobre una tela *soporte* de material plástico, un *sustrato* o capa inferior microporosa, mediante un procedimiento similar al descrito en el anterior apartado (A), para que de esta forma quede fundida sobre la tela. Sobre la superficie de dicho sustrato, a continuación se le aplica un *revestimiento* que hace de barrera ultrafina, a base de una película fina hecha de un material que tenga una alta permeabilidad al agua y una muy baja permeabilidad a las sales y otros solutos.

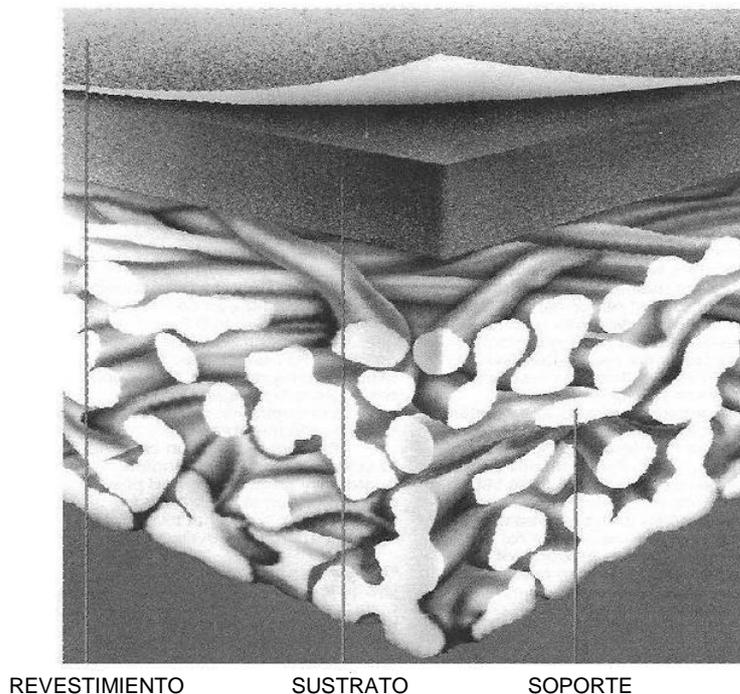


FIGURA F-III/7

Para la fabricación de esta película fina, se siguen varios procedimientos, técnicas de fundición o moldeo, de revestimiento o de polimerización interfacial. Dentro de este grupo se encuentran, p.e., las membranas FT-30 de Filmtec (USA) **(7)**, las PA-300 de Fluid Systems (UOP) (USA) **(8)**, las PEC-1000 de Toray (Japón) **(9)**, las NCM-1 de Hydranautics (USA) **(10)**.

Su forma configurativa más generalizada es la plana.

Las principales ventajas de estas membranas compuestas son:

- Para la capa fina puede emplearse un material que no tendría que estar preparado en forma de membrana asimétrica por técnicas como la de Loeb-Sourirajan.
- Puede ser perfectamente controlada la reproducción del espesor de la capa fina, en el proceso de fabricación en serie de membranas.
- Para el sustrato pueden emplearse materiales más ásperos que sean menos susceptibles a la compactación.

La producción adecuada de estas membranas requiere el empleo de un sustrato poroso muy fino al que la película fina se adhiera bien. Para lograr que la superficie soporte sea la adecuada, el diámetro de los poros en el sustrato debe ser más pequeño que el espesor de la capa a aplicar, al mismo tiempo que deben ser también no muy cerrados y en número suficiente, con objeto de que el agua que haya pasado a través de la capa fina de revestimiento, pase sin impedimento alguno a través del sustrato.

Los materiales más utilizados en este tipo de membranas son poliéster para el soporte, polisulfona para el sustrato y poliamida para el revestimiento.

Los espesores típicos de las capas varían de un fabricante a otro, en el caso de las membranas FT-30 de Filmtec **(7)** son:

- Capa fina de revestimiento: 0,2 micras.
- Sustrato: 40 micras.
- Soporte: 120 micras.

Este tipo de membranas, constituye el modelo actual para las formas configurativas planas de "última generación", cuyos prototipos más recientes exhiben

un rendimiento superior apoyado sobre una alta resistencia mecánica y química, bajo cualquier circunstancia de operación, excepto su baja tolerancia al cloro libre.

C) Membranas de poliamida aromática.

Estas membranas fueron fabricadas con configuración en forma de fibra hueca, por la firma USA DuPont Co. (11), para la comercialización de sus módulos (permeadores) B-9 y B-10. Presentan un aspecto cilíndrico asimétrico (*Figura F-III/8*), con diámetros interior/exterior aproximados de 40/80-100 micras.



FIGURA F-III/8

Estas fibras disponen de una densa y muy fina capa activa sobre su superficie externa, apoyada sobre una capa porosa más gruesa, del mismo material que la anterior, sirviéndole de soporte a aquella. Produciéndose la "permeación" desde el exterior al interior de la fibra (*Figura F-III/9*).

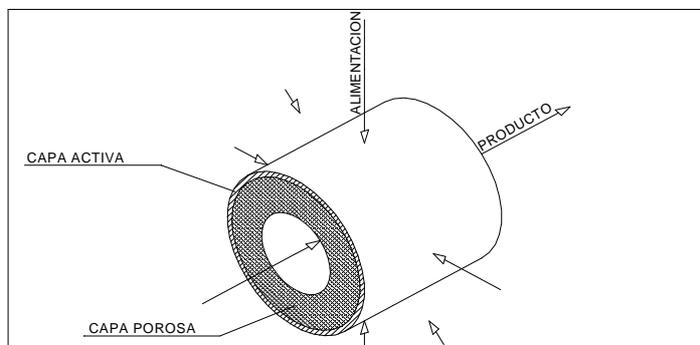


FIGURA F-III/9

Este tipo de membranas presentan, como las anteriores membranas compuestas, una buena resistencia química y mecánica junto a su baja tolerancia al cloro libre.

D) Otros tipos de membranas.

Los tres tipos de membranas de OI, comercialmente más importantes, son las ya descritas membranas de acetato de celulosa de Loeb-Sourirajan, las de poliamida aromática y las membranas compuestas.

Existen otros tipos de membranas no convencionales, entre ellas quizás los tipos más notables sean las membranas "formadas dinámicamente" y las membranas de "plasma polimerizado".

Las primeras consisten en un tipo de membrana cuya preparación se realiza a partir de material coloidal disponible en solución con polielectrolitos como el ácido poliacrílico, dicha solución se hace circular a presión sobre un substrato poroso muy fino a base de tubos metálicos, de cerámica o de carbón. De esta manera pues, la membrana se forma dinámicamente por revestimiento "in situ".

En relación a las membranas de OI convencionales, vistas anteriormente, este tipo normalmente exhibe un flujo de agua superior en torno a un orden de magnitud, mientras que su rechazo de sales sin embargo es considerablemente más bajo, y las condiciones de reproductividad son peores.

En cuanto a las segundas, preparadas por deposición de polímeros formados en estado de vapor por descarga luminiscente a través de un gas, sobre un apropiado substrato. La película depositada es densa y bastante fina. Estas membranas, en ocasiones han mostrado un alto rendimiento, pero todavía continúan en fase de investigación y no se han comercializado para su aplicación en desalación de aguas.

- MODULOS DE OI. TIPOS Y DISPOSICIONES BASICAS.

Con objeto de aportar soluciones a los problemas ingenieriles planteados, nace el concepto de módulo de OI, cuyos tipos y características se analizan en los apartados siguientes.

Existen cuatro tipos de módulos de OI actualmente comercializados, módulo de placas, tubular, de arrollamiento en espiral y de fibras huecas. De los que los dos últimos comprenden la mayor parte del mercado de desalación por OI.

.Módulo de placas.

Este tipo de módulos, también denominado de "plato y marco" (plate and frame), emplea membranas con configuración en forma plana montadas sobre placas porosas. Como puede observarse (*Figura F-III/10*), la presión se aplica al agua salada, sobre el exterior de la placa, de forma que el agua "forzada" a través de las membranas se incorpora al interior de la placa donde circula a baja presión, debido a la porosidad de la misma.

El agua desalada de cada placa se incorpora al colector de recogida, desde donde circula hacia el exterior del módulo mediante la conexión de salida del agua producto.

Las placas rígidas pueden ser construidas de plástico sólido con canales ranurados, de materiales porosos de fibra de vidrio o de papel poroso reforzado.

Comparado con los otros tipos de módulos, un sistema de OI con módulos de placas dispone de una superficie total de membrana por volumen del contenedor de presión requerido, relativamente pequeña. Por lo que para una aplicación particular, en general se necesitará disponer de un gran volumen con suficiente número de módulos. Sin embargo, este tipo de módulo permite ofrecer la flexibilidad de seleccionar

diferentes membranas para diferentes aplicaciones.

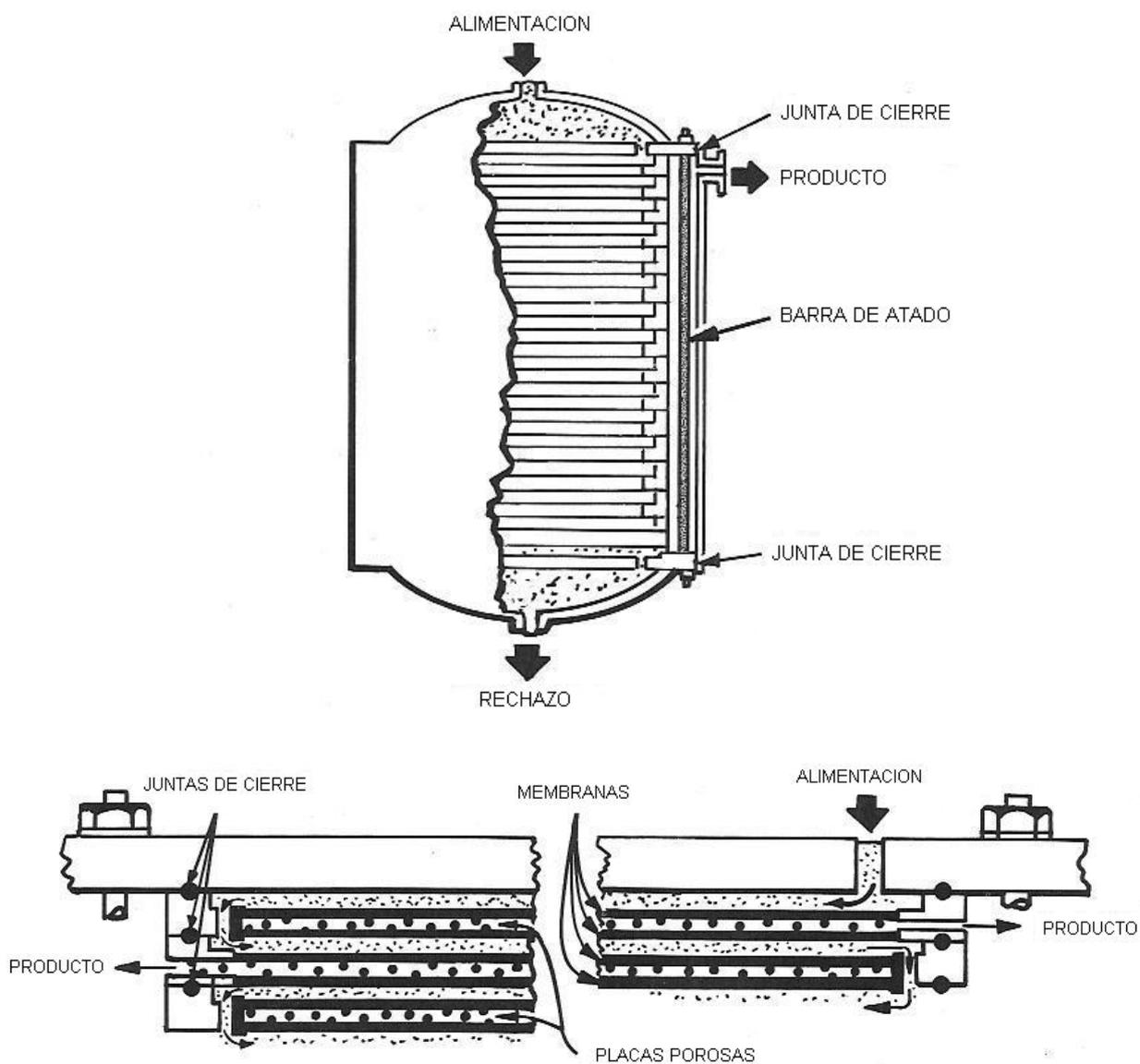


FIGURA F-III/10

.Módulo tubular.

La membrana semipermeable está adosada a la superficie interna de un tubo poroso, o bien forma parte de un revestimiento aplicado sobre dicha superficie, de forma que el diseño del tubo permite soportar la presión de operación (Figura F-III/11).

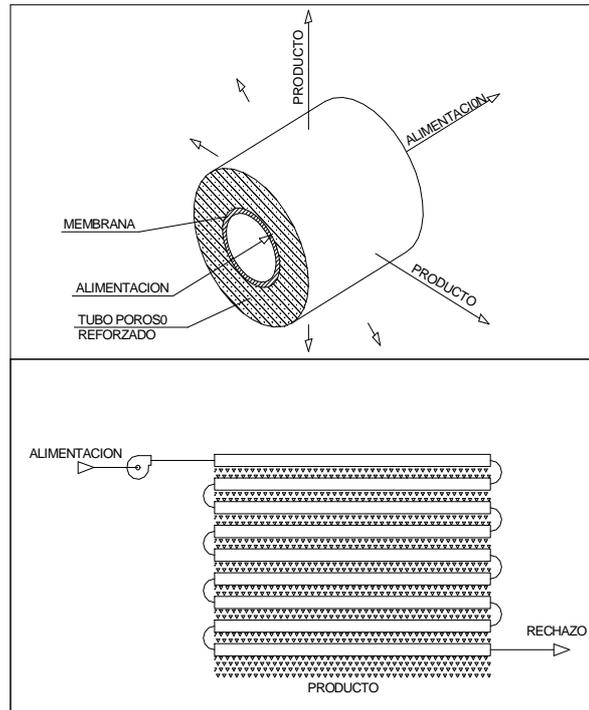


FIGURA F-III/11

El agua salina bajo presión se introduce en el interior del tubo. El agua fluye a través de la membrana y del tubo poroso, recogándose por el exterior del mismo. Por el extremo del tubo opuesto al de entrada, se recoge el rechazo o salmuera concentrada.

Los tubos son suficientemente largos como para permitir que casi todo el líquido de la solución de alimentación pase a su través. Debido a que estos módulos pueden limpiarse frecuentemente y con facilidad, los sistemas tubulares de OI se utilizan en aplicaciones especiales, donde la acumulación de partículas es alta, como p.e. en procesos de separación del almidón y del suero.

Sin embargo estos sistemas, debido a su alto costo por bajo contenido de superficie de membrana por unidad de volumen, no son eficientes para aplicaciones de tratamiento de agua a gran escala.

Módulo de arrollamiento en espiral.

Las membranas de configuración plana se enrollan por pares sobre un tubo central, en el que se recoge el permeado. La solución de alimentación circula paralelamente al tubo central, dentro de los espacios acondicionados entre las dos caras activas de las membranas por medio de unos separadores o espaciadores de salmuera (alimentación-rechazo), normalmente mallas de plástico. A su vez, las membranas están separadas por las caras correspondientes a su soportes por medio del espaciador o separador de producto, de forma que las 3 piezas (2 membranas y 1 espaciador de producto), forman un conjunto sellado ("saco") por 3 lados y por el cuarto unido al tubo central, constituyendo una "envoltura", cuyas caras exteriores corresponden a las capas activas de las membranas.

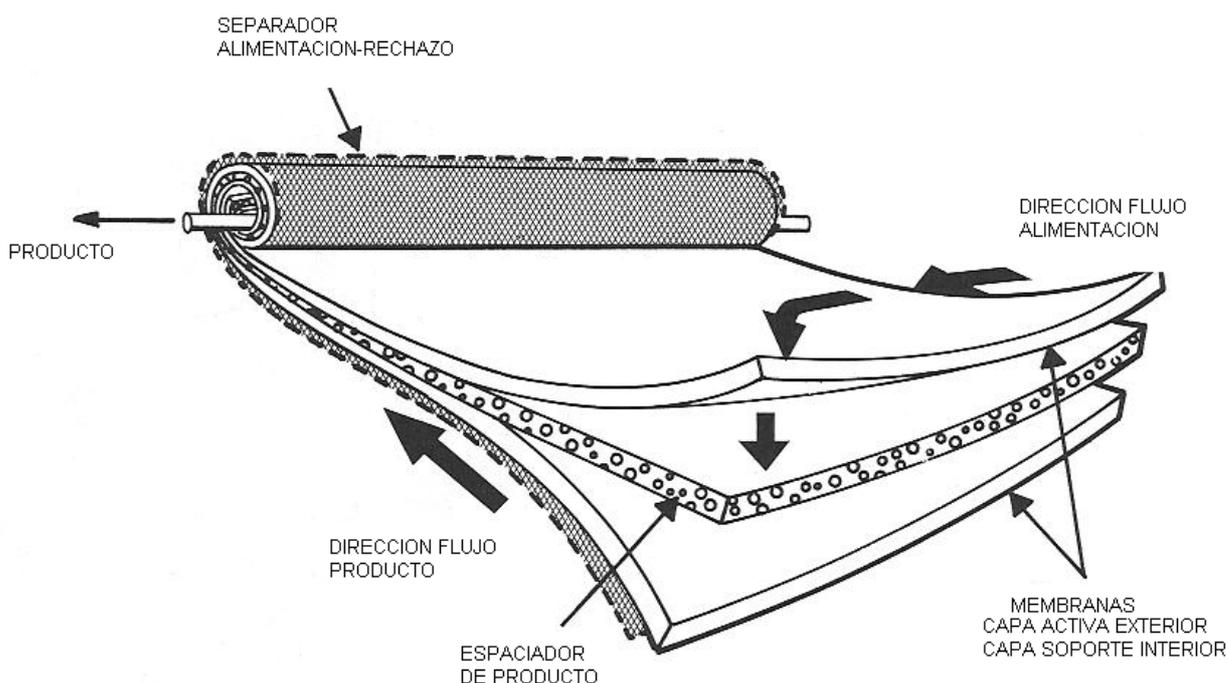


FIGURA F-III/12-1

Como puede observarse, el permeado atraviesa el material poroso, soporte de la membrana, y llega al espaciador de producto, desde el que se conduce al tubo central.

Este es un tipo de módulo mucho más compacto que los anteriores, ampliamente usado en aplicaciones de desalación.

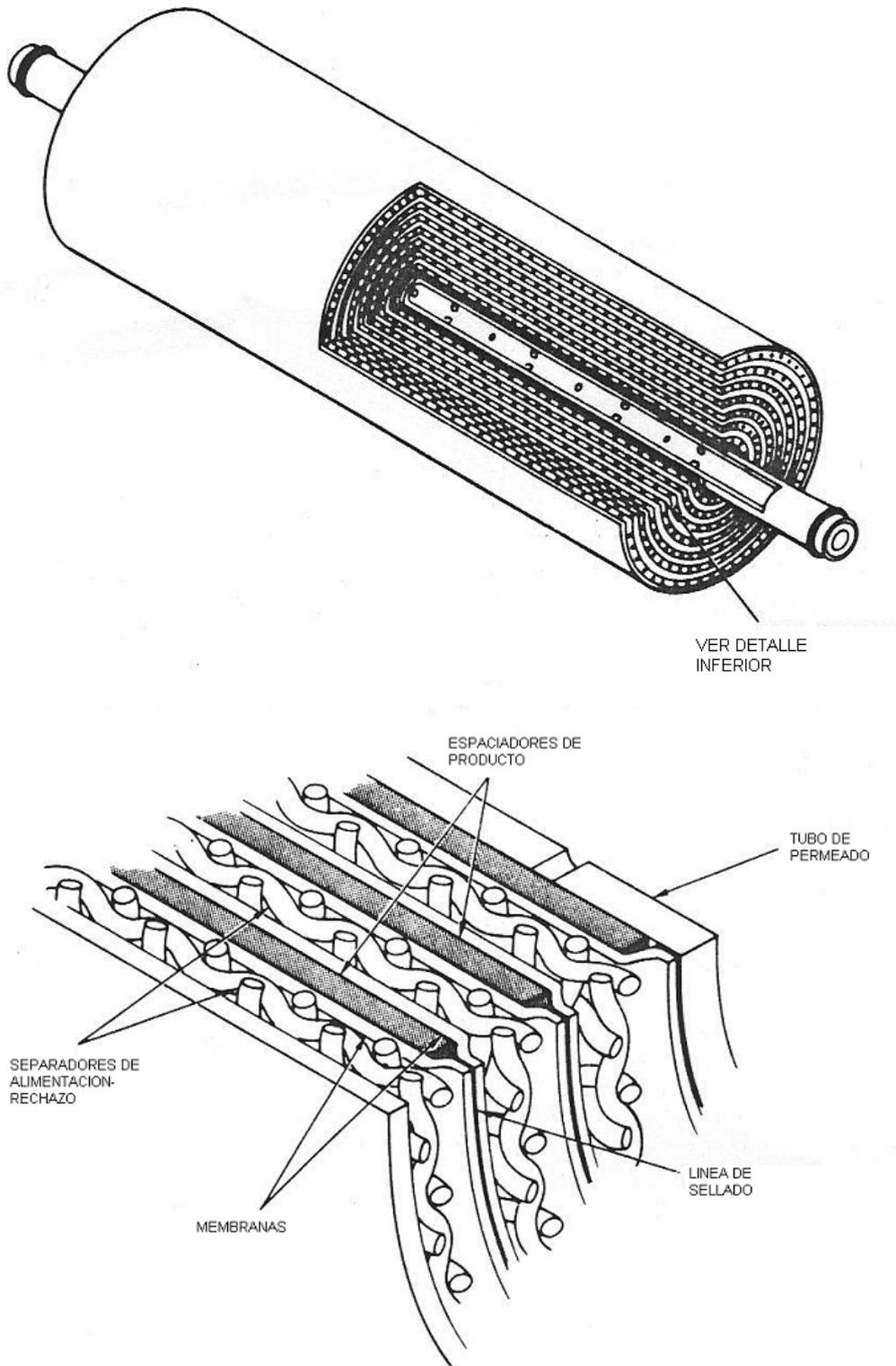


FIGURA F-III/12-2

Un sistema de OI con módulos de arrollamiento en espiral, consiste en un cierto número de estos (de 1 a 7), situados en un contenedor de presión de forma cilíndrica (tubo de presión) y conectados uno a continuación del otro, por sus tubos centrales (Figura F-III/12-3).

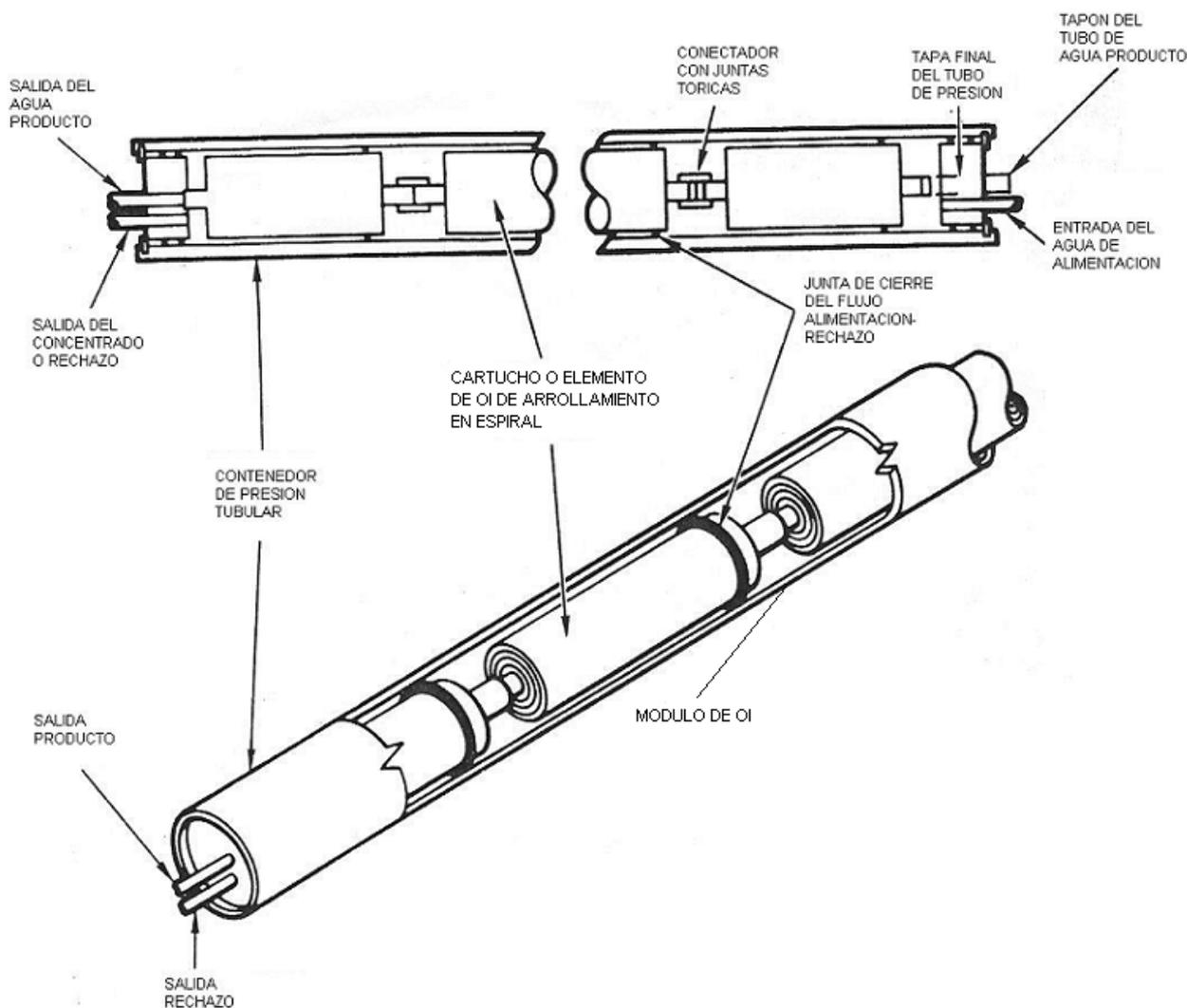


FIGURA F-III/12-3

A cada unidad individual se le denomina cartucho o elemento de OI, mientras que el conjunto formado por los elementos y su contenedor constituye el módulo de OI completo y propiamente dicho.

Los diámetros de los cartuchos están normalizados en 2,5", 4", 8" y 11", siendo su longitud estándar más usual la de 40" (1,016 m).

El agua de alimentación, entra por un extremo del contenedor de presión (tubular) y a medida que fluye a lo largo del cartucho y pasa de uno a otro, dentro del contenedor, se vuelve más concentrada y sale por el otro extremo como salmuera concentrada o agua de rechazo. Con este diseño se logra una mayor superficie de membrana por unidad de volumen, que con los anteriores diseños de placas y tubulares.

.Módulo de fibras huecas.

Las membranas con configuración en forma de fibra hueca (*Figura F-III/13*), se agrupan en módulos del tipo representado. Así, en el interior de un cuerpo de presión, de fibra de vidrio, van dispuestos, en forma de U, varios centenares de miles de fibras.

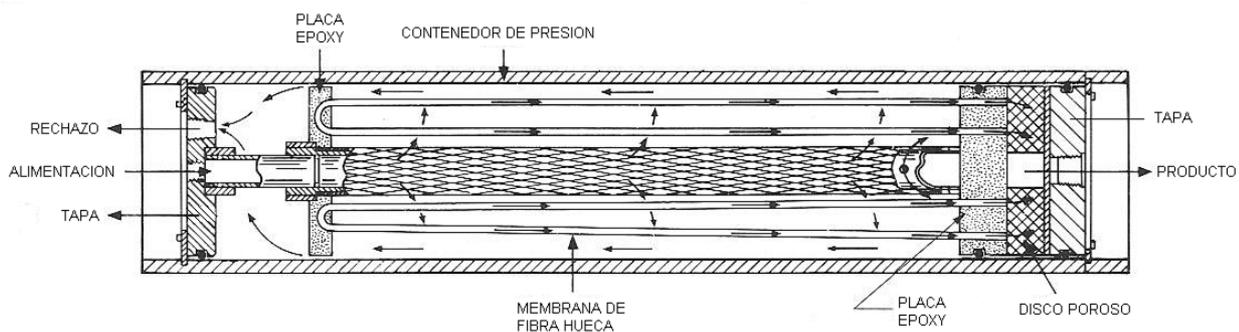


FIGURA F-III/13

El agua de alimentación, a presión, se distribuye radialmente en el interior del módulo, por medio de un tubo axial, poroso o perforado, que abastece a toda su longitud.

Por efecto de la presión exterior a las fibras, el agua atraviesa su pared, pasa al interior de su canal central, atraviesa la placa epoxy de estanqueidad, que soporta sus extremos libres, y sale del módulo después de haberse recogido en un disco poroso.

El rechazo se recoge en el exterior del paquete de fibras, antes de ser evacuado por un orificio situado por la parte de la entrada de agua. Este tipo de módulo se fabrica en diversos tamaños y debido a su forma constructiva posee una gran superficie de

membrana por unidad de volumen.

Una comparación de los méritos relativos de cada uno de los diseños modulares anteriores, se presentan en el siguiente cuadro:

Como regla general, los módulos de fibras huecas, se usan solamente para aguas salinas virtualmente exentas de materia coloidal o en suspensión, debido a la facilidad con que estos se ensucian y a la dificultad de limpieza de las fibras, una vez ensuciadas.

CARACTERISTICA	FIBRA HUECA	ARROLLAMIENTO	TUBULAR, PLACAS
Flujo y Rechazo Sales	Altos	Altos	Altos
Intervalo pH tolerado	Amplio	Amplio	Amplio
Producción / Volumen	Excelente	Buena	Regular
Ejecución Limpieza	Regular	Buena	Excelente

Antes de alimentar a un sistema de OI con módulos de fibra hueca, las aguas superficiales deben ser extensivamente pretratadas.

Los módulos de arrollamiento en espiral tienen un más ancho rango de aplicabilidad, desde el punto de vista del ensuciamiento. De hecho, este diseño tiene abarcada mas de la mitad de todo el mercado mundial de desalación, debido a la importancia de la consideración del potencial de ensuciamiento, en casi todas las aguas salinas susceptibles de desalación por OI.

Los sistemas de placas y tubulares son competitivos, solamente cuando las aguas a tratar tienen una alta turbidez y el pretratamiento no logra hacerlas adecuadas para otros tipos de módulos. Los módulos de placas son los más caros de todos, su principal virtud radica en el hecho de que al ser desarmables, se pueden limpiar de un modo más eficaz.

En cualquier tipo de módulo de OI, algunas consideraciones deben tenerse en

cuenta con respecto al flujo de la corriente de alimentación sobre la superficie de la membrana, para controlar el efecto de la "polarización de la concentración".

Así, en los módulos de arrollamiento en espiral, se dispone, para facilitar la turbulencia y minimizar el efecto anterior, del correspondiente espaciador de salmuera como parte integral del módulo.

En los de fibras huecas, el tubo poroso central de distribución del flujo, dirige a este en dirección radial sobre las fibras.

Como ya se ha indicado, un importante parámetro de diseño de cualquier módulo de OI, es su densidad de empaquetado (superficie activa de membrana por unidad de volumen del módulo), ya que si la densidad es alta significa que el volumen del contenedor de presión requerido será reducido, y por tanto el costo de fabricación será inferior y más reducida será el área de la superficie requerida para la ubicación de la planta.

Sin embargo, para comparar diferentes configuraciones modulares entre sí, el principal parámetro es el nivel de producción de agua por unidad de volumen del contenedor de presión. Así, bajo esta consideración y debido a que las membranas de fibra hueca exhiben un sustancialmente más reducido flujo que las membranas planas, bajo las mismas condiciones, las ventajas que ofrecen los módulos de fibras huecas con respecto a los de arrollamiento en espiral son pequeñas.

.Módulos de arrollamiento en espiral. Disposiciones básicas (Arreglos).

Como anteriormente se indicó, un sistema de OI con módulos de arrollamiento en espiral, consiste en un cierto número de cartuchos de este tipo (de 1 a 7), situados en un contenedor de presión de forma cilíndrica (tubo de presión) y conectados uno a continuación del otro, por sus tubos centrales, conductores del agua producto.

Para lograr una producción y conversión adecuadas, manteniendo una mínima

turbulencia que minimice el efecto de la polarización de la concentración a lo largo de todo el sistema de OI, los niveles de los flujos de alimentación y rechazo deben de ser controlados. Esto se consigue disponiendo los tubos de presión según arreglos básicos.

Las disposiciones o arreglos básicos de los contenedores de presión en las líneas o trenes de desalación por OI son: Disposición en serie, en paralelo y mixta o en “árbol de navidad” (Christmas Tree) (Figura F-III/14).

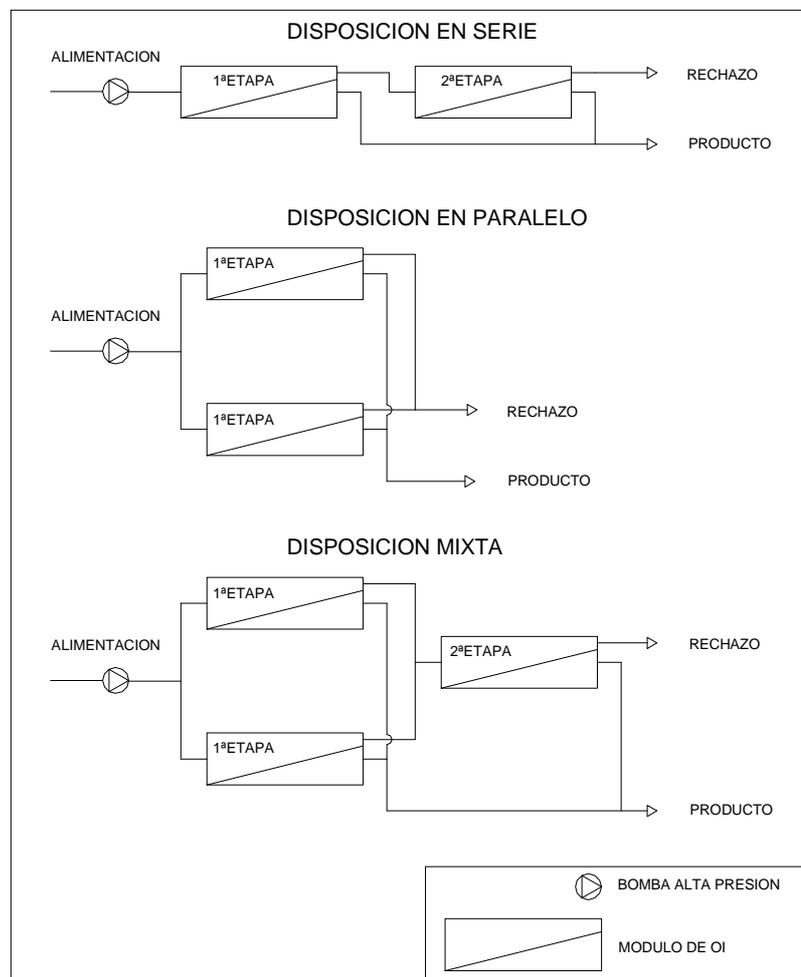


FIGURA F-III/14

Sus principales características son:

.Disposición en serie.

En este arreglo, tanto la 1ª como la 2ª etapa están formadas por un solo módulo, por lo que su aplicación estaría reducida a los casos en los que se requieran producciones bajas. Todo el flujo de concentrado o de rechazo de la 1ª etapa constituye el caudal de alimentación de la 2ª.

El número máximo de cartuchos o elementos de OI, a disponer en el sistema, considerando ambos módulos (1ª y 2ª etapa), es de 7. El factor de conversión o recuperación máxima que puede obtenerse con esta disposición es del 55%.

.Disposición en paralelo.

En este caso solo se dispone de una etapa de desalación. El número máximo de cartuchos de OI a disponer en serie en cada módulo de OI es de 7 y la recuperación máxima que puede obtenerse será del 55%.

Si se dispone de n módulos de OI en paralelo, el flujo total de alimentación al sistema de OI será n veces el flujo de alimentación a cada uno de los módulos. Los caudales totales de rechazo y producto serán por tanto n veces los caudales individuales de los módulos.

.Disposición mixta.

El flujo de alimentación a la 2ª etapa es el concentrado de la 1ª etapa. Con esta disposición, se pueden alcanzar conversiones de hasta el 90%.

Las disposiciones modulares anteriores, admiten múltiples variantes o posibilidades que se analizarán con más detalle en posteriores capítulos.

Así p.e., con una disposición (arreglo) como el mostrado (Figura F-III/15), puede obtenerse un 83,5% de conversión.

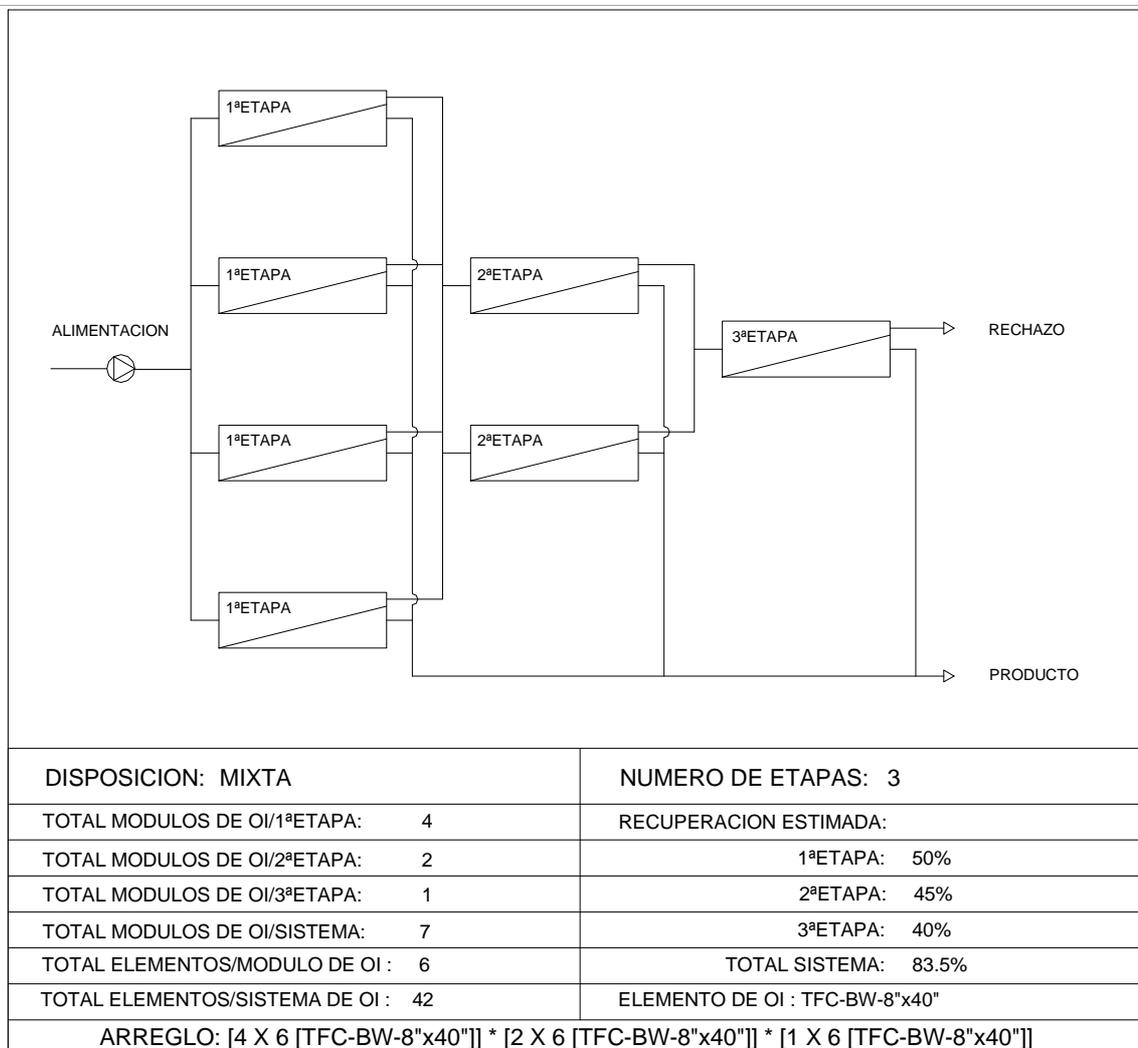


FIGURA F-III/15

En general, la producción de un sistema de OI será un dato de partida, normalmente condicionado por el caudal máximo disponible de agua bruta a tratar. Mientras que el nivel de conversión o recuperación a obtener será el máximo permitido por las características, tanto del agua de alimentación, con objeto de aprovechar al máximo los recursos hídricos existentes, como las propias del sistema de OI.

De acuerdo a estos parámetros, producción y conversión, se elegirá el arreglo adecuado según el cuadro adjunto:

CARACTERÍSTICA	SERIE	PARALELO	MIXTA
Producción	Baja	Alta	Alta
Conversión	Baja	Baja	Alta

3.3.- Bombas.

El equipo de bombeo a alta presión, es uno de los dos equipos que constituyen el sistema de tratamiento y está formado por la motobomba encargada de suministrar al agua de alimentación la presión necesaria para vencer la presión osmótica en las membranas y obtener la producción deseada.

Deberá estar construido con los materiales adecuados para resistir, simultáneamente, las altas presiones y la acción corrosiva del agua a tratar. A este efecto, experiencias prácticas recomiendan las siguientes calidades mínimas de material:

APLICACIÓN	DESIGNACION	C%	Cr%	Ni%	Mo%	Cu%	N%
Agua Salobre	AISI 316	< 0.08	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	-
Agua Salobre	AISI 316L	< 0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	-
Agua de Mar	904 L	< 0.02	19.0-23.0	23.0-28.0	4.0-5.0	1.0-2.0	-
Agua de Mar	254 SMO	<0.02	19.5-20.5	17.5-18.5	6.0-6.5	0.5-1.0	0.18-0.22

Los dos tipos de bombas generalmente usados en el sistema de tratamiento de plantas desaladoras de agua por OI, son las centrífugas y las bombas de desplazamiento positivo.

3.3.1.- Bombas centrífugas.

Son las bombas que se utilizan normalmente en los sistemas de OI de tamaño mediano y grande, debido a que tanto su instalación como su funcionamiento son menos complejos que los de las bombas de desplazamiento positivo.

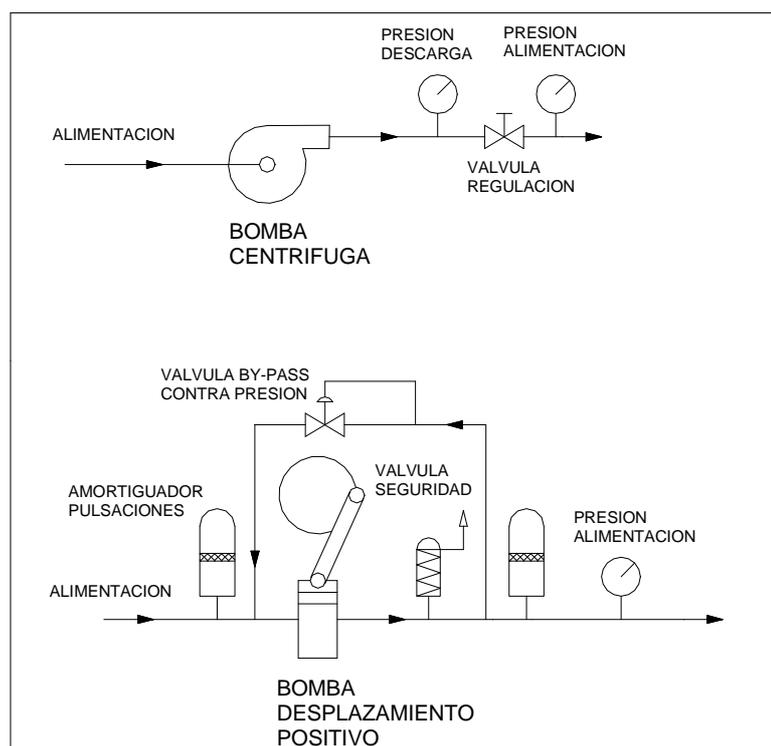


FIGURA F-III/16-1

Como puede observarse (Figura F-III/16-1), generalmente en las plantas de pequeña o mediana capacidad, el control de la presión de alimentación al sistema de OI, se realiza mediante la válvula de regulación. En plantas de superior capacidad, normalmente se usa para este fin un variador de frecuencia, con el que se ajustan las revoluciones del motor eléctrico acoplado a la bomba, para situar a esta en la curva correspondiente al punto de operación real del sistema de OI.

Ya que de acuerdo a la relación existente entre el número de revoluciones de la bomba (n), el caudal y la presión neta de operación (Q y H), así como la potencia

absorbida por la misma (N):

$$(n/n_1) = (Q/Q_1) \quad (Ec.5/3)$$

$$(n/n_1)^2 = (H/H_1) \quad (Ec.6/3)$$

$$(n/n_1)^3 = (N/N_1) \quad (Ec.7/3)$$

En las que, n, Q, H, y N representan los parámetros operacionales en las condiciones nominales de diseño y n₁, Q₁, H₁ y N₁, los correspondientes a las condiciones reales de operación.

Variando el n° de revoluciones de la bomba, conseguimos situar las curvas de trabajo, en el punto de funcionamiento óptimo, sin pérdida de energía, al mismo tiempo que mejoramos el arranque (puesta en marcha), tanto del grupo motobomba como del sistema de OI, ya que podremos realizar este, escalonadamente en el tiempo, con lo que facilitamos la purga de aire y evitamos sobrecargas bruscas y posibles cavitaciones.

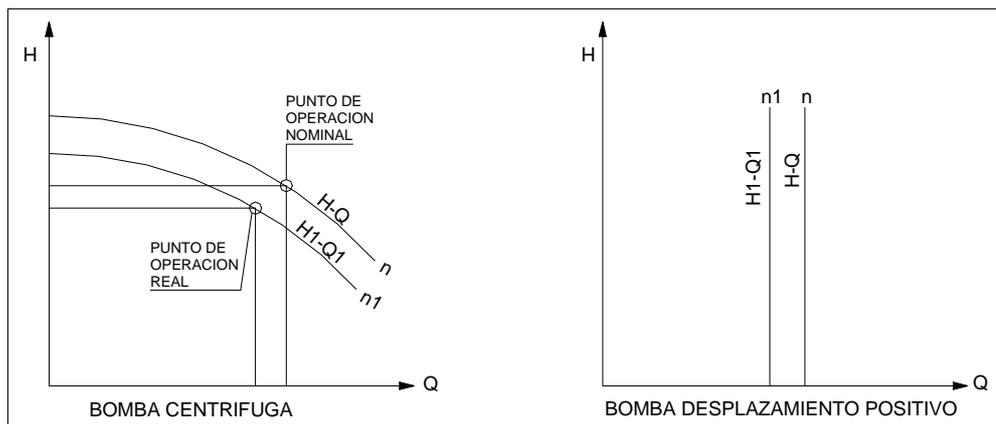


FIGURA F-III/16-2

En definitiva se adapta el grupo a los requerimientos del sistema (Figura F-III/6-2).

El hecho de limitar la instalación del variador de frecuencia a plantas de superior capacidad (a partir de 500 m³/día para agua de mar o 1000 m³/día para agua salobre), se debe exclusivamente a razones económicas, dada el coste del variador dentro de lo que supone el conjunto de la planta.

En los sistemas de OI aplicados a la desalación de aguas salobres el tipo de bomba centrífuga mas empleado es el de impulsor axial multietapa vertical o horizontal, como es el caso de la figura adjunta.

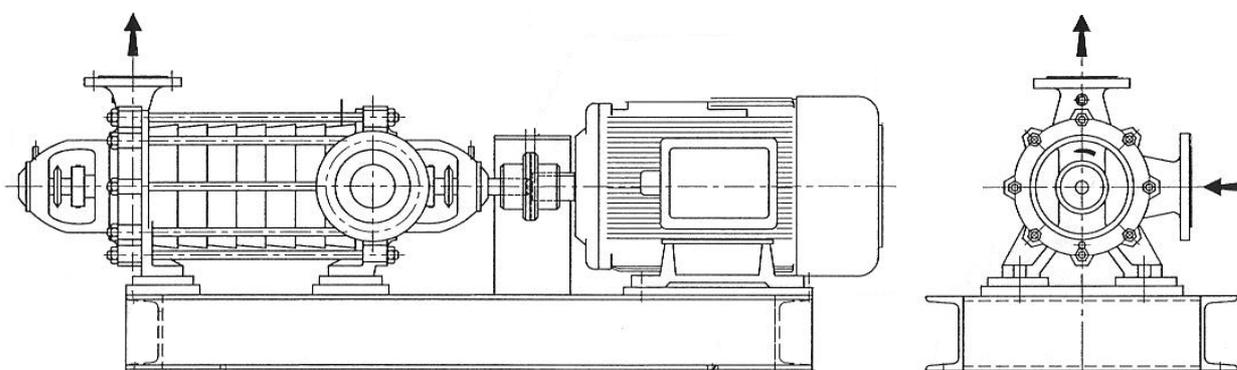


FIGURA F-III/16-3

3.3.2.- Bombas de desplazamiento positivo.

Aunque pueden emplearse en sistemas grandes, se utilizan con más frecuencia en los de pequeño tamaño.

El caudal y la presión se controlan mediante la instalación de una válvula de contra presión en la línea de by-pass (*Figura F-III/16-1*). Aún siendo posible y aconsejable, la regulación mediante la instalación de un variador de frecuencia, normalmente se desestima, ya que al tratarse de sistemas pequeños, se encarecería bastante la planta.

Este tipo de bombas requiere además la instalación de una válvula de seguridad en la línea de descarga y amortiguadores de pulsación (acumuladores), tanto en la

línea de descarga como en la aspiración, para minimizar los efectos de las pulsaciones de presión sobre las membranas y sobre los restantes equipos y componentes de la planta.

La ventaja que presentan frente a las bombas centrífugas es su superior rendimiento. Diferencia que se hace más apreciable para caudales pequeños (flujos de alimentación inferiores a 10 m³/h). En desalación de aguas por OI el tipo de bomba de desplazamiento positivo mas empleado es el de pistón (Figura F-III/16-4).

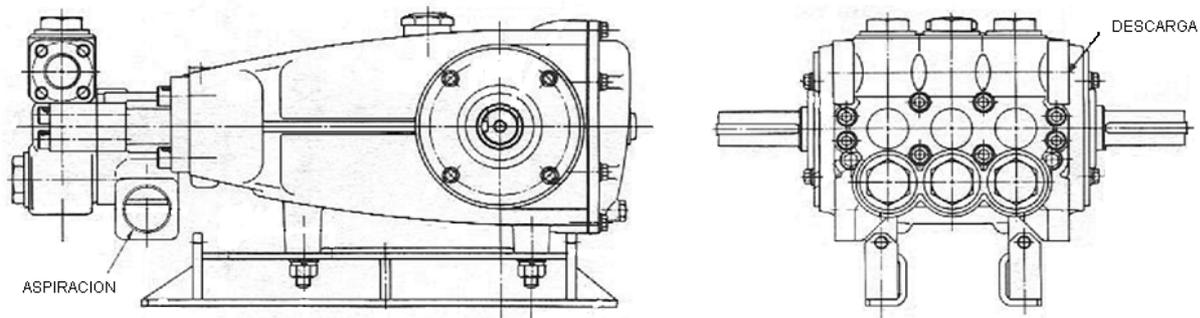


FIGURA F-III/16-4

En las plantas desaladoras de agua por OI, el grupo motobomba de alta presión del sistema de OI, demanda una potencia en CV, cuyo valor viene dado por la expresión:

$$N = (H \times Q) / (75 \times \eta_b \times \eta_m) \quad (Ec.8/3)$$

Con H en m. y Q el l/sg. Siendo η_b y η_m los rendimientos de la bomba y del motor respectivamente.

Lo que supone el principal consumo de energía de la planta.

En sistemas de OI aplicados a desalación de agua de mar, normalmente el 55-

60% del agua de alimentación presurizada, se descarga como rechazo, con una presión del orden de 60 kg/cm^2 . Esta energía de presión puede ser recuperada en parte y disminuir con ello, el consumo total de energía de la planta.

Existen varios métodos de recuperación de energía que se utilizan en la práctica a nivel comercial, entre los que podemos citar:

- Turbina Pelton.
- Bomba de funcionamiento inverso.
- Intercambiador de trabajo del tipo pistón.

El concentrado o rechazo, a alta presión, se conduce hacia el recuperador de energía, donde parte de esta se transforma en energía cinética (dos primeros métodos), dando lugar a una salida de rotación que se recupera como potencia en el eje del motor acoplado a la bomba de alta presión. En el tercer método, la energía de presión se transmite, por medio de un pistón, a la corriente de alimentación, con lo que las necesidades de disposición de potencia en la bomba de alta presión disminuyen.

Con estos métodos pueden conseguirse recuperaciones de energía de hasta un 40% de la necesaria sin recuperador. En la figura adjunta se muestra un sistema de recuperación de energía mediante turbina Pelton.

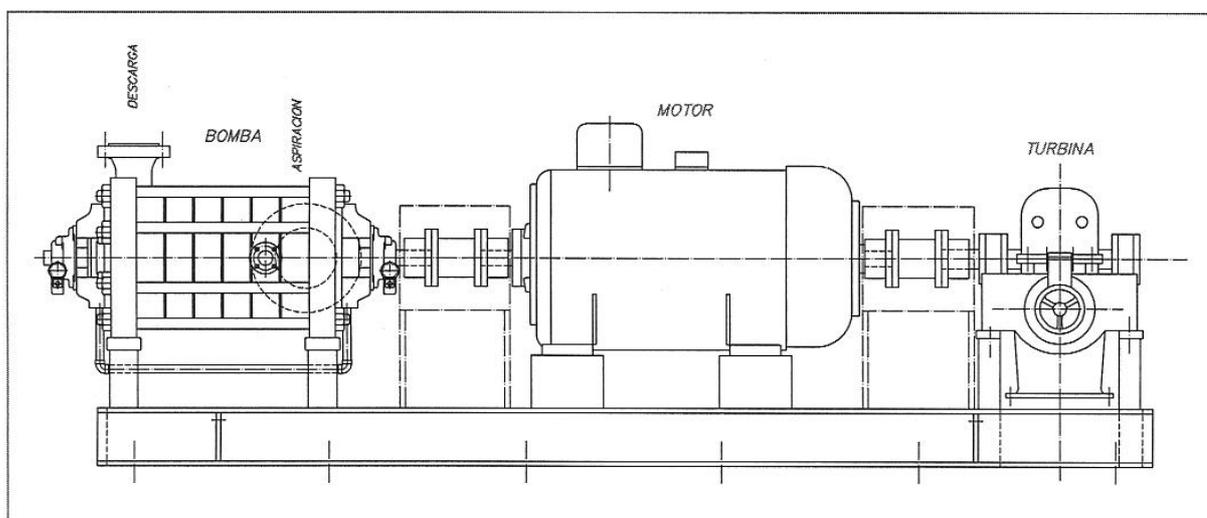


FIGURA F-III/16-5

3.4.- Pretratamientos.

Como se ha visto en los apartados anteriores, la mayor o menor complejidad del sistema de pretratamiento, será dictada por la calidad y consistencia del agua de alimentación.

Las aguas salobres procedentes de pozo, generalmente requieren únicamente de un acondicionamiento básico. En este caso los componentes fundamentales del sistema de pretratamiento más simple, son los indicados en la figura:

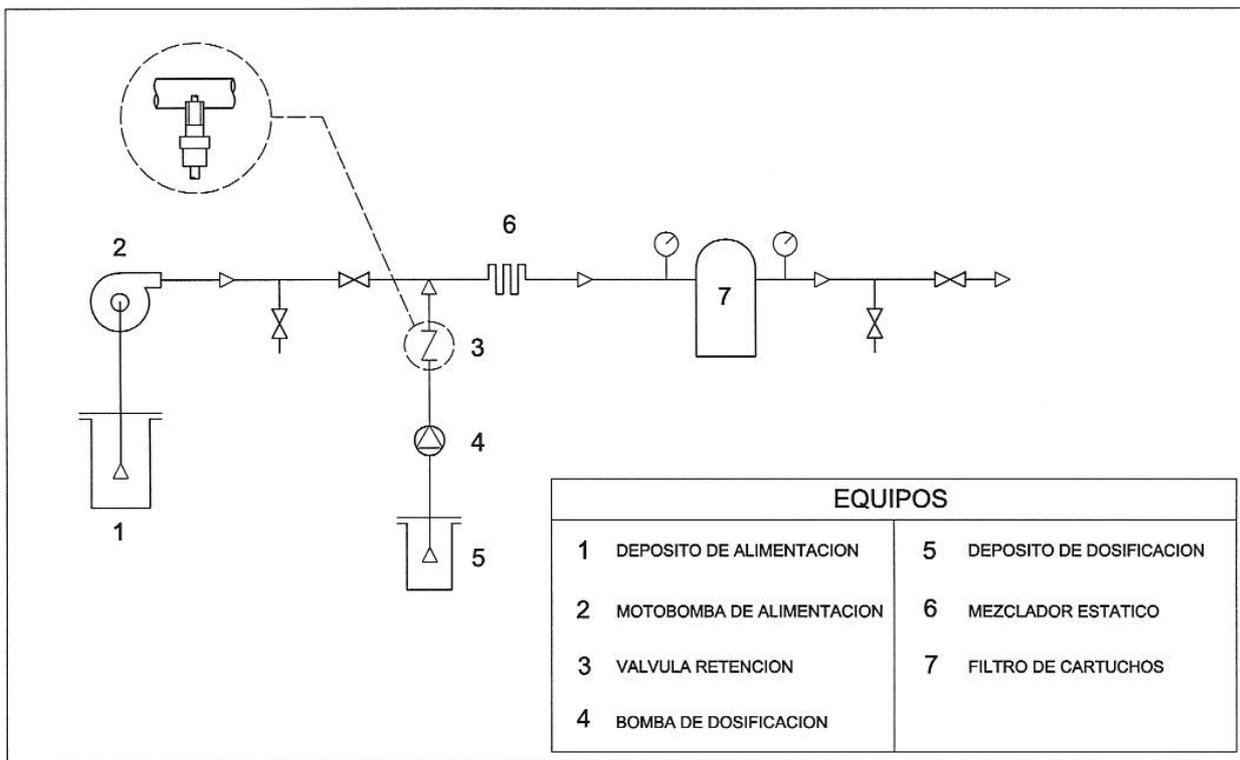


FIGURA F-III/17

* Un equipo de alimentación para transferencia del agua bruta desde el pozo o depósito de alimentación a la planta, en las debidas condiciones de presión y caudal.

* Una unidad de dosificación de ácido y/o anti-incrustante.

* Un equipo de microfiltración con cartuchos calibrados para 5-10 micras.

Cualquier agua contiene impurezas, ya sea en solución como en suspensión, y es la presencia de estas la que produce una serie de dificultades, a la hora de una posterior aplicación de la misma. Por lo que, generalmente, su acondicionamiento previo es esencial.

En la *tabla T-III/1*, se da una lista de las impurezas más comunes encontradas en el agua, las dificultades causadas y los tratamientos sugeridos.

Algunas de estas impurezas, son precisamente la razón del uso de procesos que, como el de la OI, posibilitan una aplicación final del agua. Sin embargo otras, como se aprecia en la tabla citada, pueden provocar dificultades para que procesos de desalación, como el de la OI u otros, puedan ser finalmente aplicados.

Al ser la desalación de aguas por OI un proceso de concentración, en algunos aspectos puede compararse con otros procesos o tratamientos, en los que el agua tiene un importante papel, como pueden ser por ejemplo, torres de refrigeración, sistemas de evaporación o destilación, etc.

Como en los demás procesos convencionales de desalación, la eficacia de la OI, puede verse seriamente afectada por los constituyentes de la propia agua de alimentación.

Por ejemplo, la deposición de sólidos en suspensión, la presencia de precipitados de hierro y manganeso, algas, microorganismos, incrustaciones debidas al carbonato y sulfato cálcico, presencia de aceites, grasas u otras materias orgánicas ensuciantes, pueden producir graves problemas en cualquier sistema de desalación.

TABLA T-III/1: IMPUREZAS EN AGUAS

CONSTITUYENTE	FORMULA QUIMICA	DIFICULTAD CAUSADA	TRATAMIENTOS
TURBIDEZ		Depósitos en conductos, calderas, equipos de procesos, etc.	Coagulación, floculación, decantación, filtración.
COLOR		Manchas en productos finales de procesos. Interfiere en métodos de precipitación.	Coagulación y filtrado. Adsorción por carbono activado.
DUREZA	Suma de contenidos en Ca^{2+} y Mg^{2+} , expresados en ppm como CaCO_3 .	Principal fuente de incrustación en equipos de intercambio de calor, calderas, conductos, etc. Interfiere con tintes, lavados, etc.	Descalcificación. Destilación. Tratamientos con agentes activos.
ALCALINIDAD	Suma de contenidos en $(\text{HCO}_3)^-$, $(\text{CO}_3)^{2-}$ y $(\text{OH})^-$ expresados en ppm como CaCO_3 .	Los carbonatos y bicarbonatos producen CO_2 , el cual es una fuente de corrosión.	Tratamientos con ácidos. Desmineralización. Intercambio iónico. Destilación.
ACIDOS	SO_4H_2 , ClH , etc.	Corrosión.	Neutralización alcalina.
DIOXIDO DE CARBONO	CO_2 .	Corrosión en conductos de agua, particularmente en líneas de vapor y condensado.	Aireación. Desgasificación. Neutralización alcalina.
pH	$-\text{Log}(\text{H}^+)$.	Su valor varia de acuerdo a que el agua sea ácida o alcalina. Casi todas las aguas naturales tienen un pH comprendido entre 6 y 8.	Puede subirse con compuestos alcalinos y ser bajado con ácidos.
SULFATOS	$(\text{SO}_4)^{2-}$	Componente iónico normal de un agua. La forma de sulfato cálcico es incrustante.	Desalación. Desmineralización. Destilación.
CLORUROS	Cl^-	Añadido en forma de cloruro sódico a un agua, hace subir el carácter corrosivo de la misma.	Desalación. Desmineralización. Destilación.
NITRATOS	$(\text{NO}_3)^-$	Presente en las aguas en cantidades poco significantes. A partir de ciertas concentraciones provoca problemas de salubridad.	Desalación. Desmineralización. Destilación.
FLUORUROS	F^-	Usado para control de la caries dental. Inusual en las aguas, es un ión con fuerte tendencia	Adsorción con hidróxido de magnesio, fosfato cálcico, carbón animal. Coagulación

		a formar compuestos con iones polivalentes.	con sulfato de aluminio.
SILICE	SiO ₂	Produce incrustaciones en calderas y en sistemas de refrigeración de aguas.	Tratamiento con sales de magnesio en procesos de calor. Adsorción por resinas de intercambio iónico fuertemente básicas, combinada con desalación, desmineralización o destilación.
HIERRO	Fe ²⁺ (Ferroso) Fe ³⁺ (Férrico)	Presente en el agua en formas insolubles o poco solubles, que tienden a precipitar y formar depósitos en líneas, calderas, etc. Interfiere en la fabricación de tintes, papel, etc.	Aireación. Coagulación y filtración. Ablandamiento con cal. Intercambio catiónico. Tratamientos de retención con agentes activos.
ACEITES, GRASAS		Ayuda a la formación de incrustaciones, sedimenta, impide el intercambio de calor. Indeseable en casi todos los procesos.	Separadores de impacto. Coladores. Coagulación y filtración. Filtrado con diatomeas.
MANGANESO	Mn ²⁺	Igual que el hierro.	Ídem que para el hierro.
OXIGENO	O ₂	Corrosión en conductos de agua, equipos de intercambio de calor, calderas, líneas de retorno, etc.	Deaireación. Sulfito sódico. Inhibidores de corrosión.
SULFURO DE HIDROGENO	SH ₂	Mal olor. Corrosión.	Aireación. Cloración. Intercambio aniónico altamente básico.
AMONIACO	NH ₃	Corrosión de aleaciones de cobre y zinc por formación de complejos iónicos solubles.	Intercambio catiónico con zeolita hidrogeniónica. Cloración. Deaireación.
CONDUCTIVIDAD	Expresada en μΩ/cm.	Resultado de los sólidos en solución ionizables. La alta conductividad, normalmente, da como resultado un incremento en las características corrosivas del agua.	Desalación. Desmineralización. Destilación.
SÓLIDOS DISUELTOS		Es la medida de la cantidad total de materia disuelta, determinada por evaporación Las altas concentraciones de	Ídem anterior.

		sólidos disueltos no son recomendables ya que causan interferencias o impiden la realización de procesos.	
SÓLIDOS EN SUSPENSION		Es la medida de la cantidad de materia no disuelta, determinada gravimétricamente. Los sólidos en suspensión, pueden taponar líneas, formar depósitos en equipos de intercambio de calor, calderas, etc.	Asentamiento. Filtración normalmente precedida por coagulación, floculación y decantación.
SÓLIDOS TOTALES		Es la suma del total de sólidos disueltos y sólidos en suspensión.	Ídem dos anteriores.

3.4.1.- Justificación del sistema de pretratamiento. Objetivos.

Los componentes de cualquier planta de desalación de aguas salobres por OI, como ya se ha visto (apartado. 3.1.2), se engloban según 3 sistemas generales, sistema de pretratamiento, sistema de tratamiento (OI) y sistema de postratamiento.

Debido a que el rendimiento de una planta de este tipo, como se verá mas adelante en próximos capítulos, depende principalmente de las siguientes variables:

A) Rendimiento de los parámetros característicos de la membrana empleada (productividad y rechazo de sales).

B) Vida útil de la membrana, o periodo de operación de la misma en condiciones aceptables.

C) Coeficiente o factor de utilización de la planta (porcentaje del tiempo de operación real, respecto del teórico).

Cualquier disminución de sus valores, causaría por tanto una degradación del rendimiento de la planta. Los tres factores fundamentales que podrían ser causa directa de aquella disminución y, por tanto, de esta degradación son:

- Acondicionamiento del agua de alimentación a las características de la membrana (pH, temperatura, SDI, etc.).
- Diseño del sistema de OI para la membrana empleada (presión, recuperación, etc.).
- Operación y mantenimiento (tipos y ciclos de limpieza, etc.).

Los 3 factores expuestos, tienen una base común.

Tanto para acondicionar el agua de alimentación a las características de la membrana empleada, como para diseñar, operar y mantener el sistema en las debidas condiciones, se hace necesario un tratamiento previo del agua bruta, que garantice el cumplimiento de estos condicionantes.

Esta es la razón de ser y propósito del sistema de pretratamiento, de cuya importancia da idea el gráfico mostrado (*Figura F-III/18*), en el que se indica la evolución, frente al tiempo de operación, de la producción de la planta.

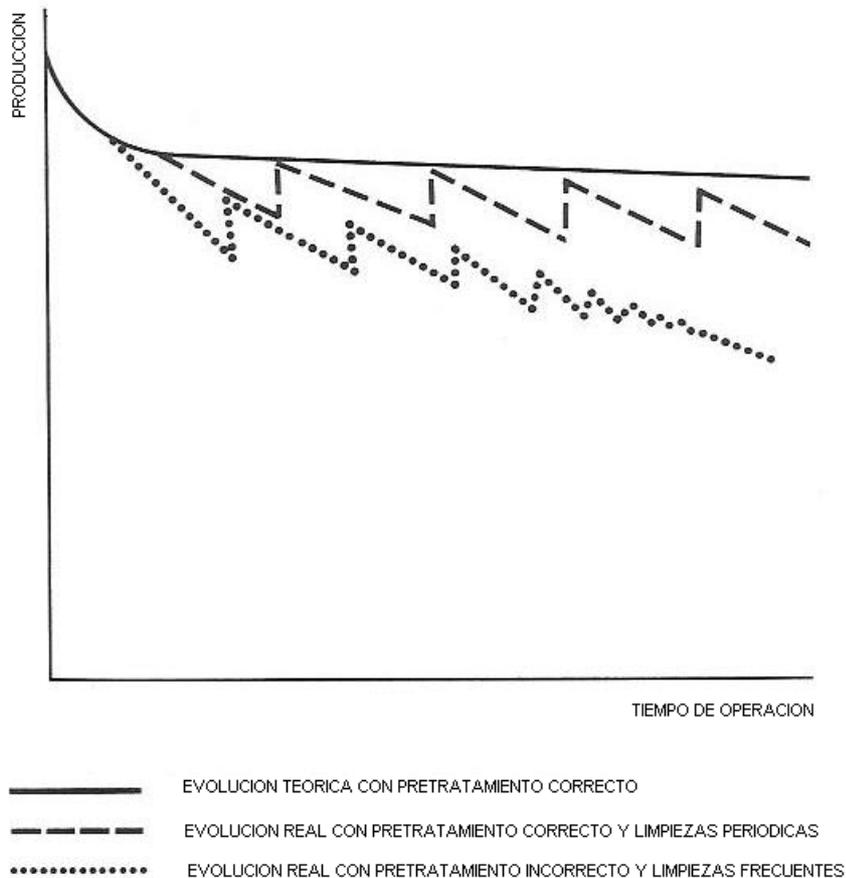


FIGURA F-III/18

OBJETIVOS.

Como ya se ha indicado, y según la propia definición del mismo (apartado. 3.1.2), la función básica del sistema de pretratamiento, es la de acondicionar el agua bruta a desalar, a las características de operación del resto de los equipos que constituyen la planta.

Con el sistema de pretratamiento, se pretenden conseguir, por tanto, los siguientes objetivos:

1) Alejar el exceso de turbidez o sólidos en suspensión, que pueda ser causa de problemas en el sistema de OI (bomba de alta presión y módulos de OI) y/o en los

equipos de instrumentación y control. Ya que provocarían cierres de paso al flujo normal de agua o la formación de depósitos sobre la superficie de las membranas, causando cambios en los pasos de sales y agua a través de estas, en los módulos de OI.

2) Ajustar y controlar los valores de pH y temperatura de la alimentación, para prolongar la vida de las membranas y asegurar unos niveles óptimos de calidad y cantidad de producto.

3) Evitar o controlar la formación de compuestos susceptibles de precipitación y, con ello de cerrar el paso de agua, al revestir la superficie de las membranas.

4) Desinfectar la alimentación, prevenir los crecimientos microbiológicos y evitar la contaminación de los equipos.

5) Evitar la presencia en el agua de alimentación de aceites, grasas u otros compuestos orgánicos similares, que puedan depositarse sobre las membranas. O compuestos como disolventes o reactivos orgánicos, que puedan atacar la estructura de la membrana, a otros componentes de los módulos de OI, o a otras partes del resto de los equipos que constituyen la planta.

Si descontamos el objetivo 2º, aplicable al caso de empleo de membranas tipo AC (celulósicas), debido a la degradación química (hidrólisis), que experimentan cuando operan fuera de unos rangos concretos de pH y temperatura (Figura F-III/19). Pero no a los casos de membranas del tipo PA, debido a su capacidad de operación con amplios márgenes de pH y temperatura (aptdo. 3.2). Observamos que todos los objetivos del sistema de pretratamiento, están dirigidos a evitar cualquier tipo de ensuciamiento de los módulos de OI, y concretamente de las membranas que estos incluyen.

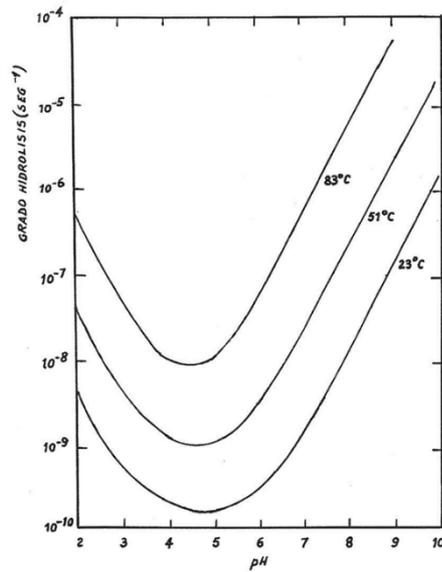


FIGURA F-III/19

3.4.2.- Tipos de ensuciamientos. Causas, efectos y soluciones.

En la tabla T-III/2, se muestra un cuadro con la identificación de los principales problemas de ensuciamiento producidos en plantas de OI, cuales han sido sus causas y posteriores efectos sobre los módulos de OI, y finalmente se indican las soluciones prácticas a estos problemas.

Se ha pretendido hacer una exposición resumida, clasificando las sustancias en orden al tipo fundamental de ensuciamiento que provocan. Debe entenderse que tal clasificación se ha realizado con carácter general, por cuanto como ya veremos, existen sustancias que pueden producir varios tipos de ensuciamiento, dependiendo de las formas en que estén presentes en el agua de alimentación y/o en la forma en la que precipiten sobre la superficie de las membranas.

Otra consideración que debe ser hecha, es la de que en la práctica, es más difícil apreciar diferenciación entre los efectos producidos, ya que normalmente el problema es provocado por varios tipos de ensuciamiento, producidos simultáneamente.

TABLA T-III/2: IDENTIFICACIÓN DE LOS PRINCIPALES PROBLEMAS DE ENSUCIAMIENTO EN PLANTAS DE OI

TIPO	CAUSAS	EFECTOS			SOLUCION
		P _s (*)	PD (*)	F _p (*)	
INCRUSTANTE	Óxidos metálicos (Hierro, Manganeso, etc.)	Rápida e importante subida.	Rápida e importante subida.	Rápido e importante descenso.	*Evitar agentes oxidantes. *Controlar el valor de pH en función del O ₂ . *Utilizar materiales adecuados. *Emplear agentes anti-incrustantes. *Para altas concentraciones: oxidación, coagulación y filtrado.
	Sílice	Rápida e importante subida.	Rápida e importante subida.	Rápido e importante descenso.	*Controlar la recuperación en función de la temperatura y pH. *En grandes plantas, ablandamiento con cal y adición en el clarificador de cloruro férrico y aluminato sódico.
	Precipitados de calcio, estroncio y bario. (carbonatos, sulfatos, fosfatos y fluoruros)	Gradual y acusada subida.	Gradual y acusada subida.	Gradual y acusado descenso.	*Reducir la recuperación para no exceder los límites de solubilidad. *Descalcificación por intercambio iónico. *Adición de ácido. *Dosificación de anti-incrustantes.

ATASCAMIENTO	Coloides inorgánicos. (silicatos de aluminio, hidróxidos de hierro y aluminio)	Gradual e importante subida.	Gradual e importante subida.	Gradual e importante descenso.	*Control del SDI y del potencial zeta. *Empleo de materiales adecuados. *Filtración con diatomeas. *Filtración a presión, sobre arena o arena-antracita. *Empleo de sistemas de coagulación-filtración o coagulación, floculación y filtración en línea.
	Compuestos orgánicos (aceites, grasas, etc.)	Gradual y acusada subida.	Rápida y fuerte subida.	Rápido y fuerte descenso.	*Identificación de sustancias. *Tratamientos previos del agua bruta antes de su envío a la planta de OI: -Empleo de técnicas de adsorción. -Coagulación, floculación, sedimentación y filtrado.
BIOLOGICO	Microorganismos. (lamas de bacterias): - Formación con la planta en operación.	No es significativa.	Lenta y poco acusada subida	Lento y acusado descenso.	*En plantas pequeñas, radiación ultravioleta. *Cloración y posterior dechloración.
	Microorganismos. (lamas de bacterias): - Formadas durante extenso periodo de parada.	De importante a fuerte subida.	Fuerte subida.	Fuerte descenso.	*Limpieza química, protección biológica y análisis bacteriológico.

(*):

P_s : Paso de sales.

PD : Presión diferencial a través de las membranas.

F_p : Flujo de producto.

3.4.3- Ensuciamientos biológicos.

El desarrollo de microorganismos en los módulos de OI, afecta al rendimiento del sistema, e incluso puede llegar a destruir algunos tipos de membranas (AC). Cuando se analiza la cuestión biológica en una planta de desalación por OI, deben considerarse tres

aspectos de la misma:

- 1) Degradación de la membrana.
- 2) Ensuciamiento de la membrana.
- 3) Contenido bacteriano en el agua producto.

Los dos primeros afectan al diseño del sistema de pretratamiento, mientras que el tercero normalmente se considera a la hora de tratar el sistema de postratamiento, y por tanto se verá en el apartado correspondiente.

En cuanto al primer aspecto, como los módulos de OI que utilizan membranas del tipo PA, no son susceptibles de degradación por microorganismos, no se requerirá por tanto una protección adicional frente a ataques biológicos. Por lo que será exclusivamente el aspecto de ensuciamiento el único a considerar, en nuestro caso.

El crecimiento biológico y posterior ensuciamiento en los módulos del sistema de OI, pueden ser debidos, por un lado al tratamiento de un agua de alimentación que poseyendo un cierto contenido bacteriológico, no haya sido adecuadamente pretratada. O bien porque se haya producido durante periodos de parada de la planta, sin haber adoptado las oportunas precauciones.

Cuando el agua bruta a tratar procede de pozo, generalmente su *contenido total bacteriano* (CTB) es bajo, y no requiere un pretratamiento para prevenir el crecimiento biológico, salvo que haya recibido una contaminación de fuentes externas. Por contra las aguas de procedencia superficial, si que generalmente presentan altos niveles de CTB, y requieren el correspondiente pretratamiento.

En plantas de desalación de aguas salobres por OI, la cloración es el proceso más empleado, debido a la gran eficacia del mismo como agente desinfectante, a la simplicidad de su uso y a su considerable poder oxidante lo que favorece la destrucción

de materia orgánica.

Los agentes de cloración más frecuentemente usados son el cloro gas y el hipoclorito sódico o cálcico. La efectividad de la cloración depende de la concentración de Cl_2 , del tiempo de exposición y del pH del agua (la desinfección se produce mejor en medio ácido que en alcalino).

En general, manteniendo una concentración de 0,5 a 1 mg/l de cloro libre residual en el agua de alimentación, es suficiente para prevenir el ensuciamiento biológico.

Ahora bien teniendo en cuenta que, la resistencia al cloro de las membranas tipo PA es muy baja, en la mayoría de ellas nula, el contenido en cloro del agua de alimentación a su entrada al sistema de OI debe ser 0 mg/l. Por lo que al proceso de cloración, y justo antes de la microfiltración, debe seguir otro de decloración. La etapa de pretratamiento debe contemplar pues, en este caso, ambos procesos.

El proceso de decloración puede ser realizado por medio de carbono activado, a través de la reacción:



La decloración por medio de lechos de carbono activado, presenta sin embargo los siguientes inconvenientes:

- Se requieren grandes cantidades de carbono.
- Una vez el lecho de carbono activado se haya saturado con cloro, no absorberá mas, quedando el resto libre para pasar hacia el sistema de OI. Por lo que el lecho de carbono debe renovarse periódicamente.
- Las partículas de carbono activado, en contacto con el agua, pueden desintegrarse a tamaños más pequeños, que causarían ensuciamientos

prematureos de los cartuchos de microfiltración.

- Desde que la decoloración se haya producido, el desarrollo bacteriano en los propios lechos de carbono puede llegar a ser extremadamente alto.

Por estas razones, actualmente se realiza la decoloración con agentes químicos, preferentemente bisulfito sódico (NaHSO_3) o metabisulfito sódico ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$).

El empleo de otros agentes para decoloración, como el sulfito sódico (Na_2SO_3) o el tiosulfato sódico ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), es contraproducente debido a que el primero de ellos puede causar degradación en la estructura de la membrana y el segundo provocar la precipitación de depósitos de azufre sobre la membrana.

La decoloración con bisulfito sódico, se produce por medio de la reacción:



Teóricamente los requerimientos aproximados serían de 1,34 ppm/ppm de exceso de cloro, para el metabisulfito sódico, o de 1,47 ppm para el bisulfito sódico. Sin embargo, en la práctica, por razones de seguridad el sistema de dosificación se ajusta para una dosis mínima de 2,5-3 ppm de bisulfito sódico por ppm de cloro. Debiendo estar la dosificación regulada por el correspondiente medidor-controlador de cloro libre.

En el sistema de dosificación, debe tenerse la precaución de controlar la estabilidad de la solución de bisulfito sódico, ya que en función de su concentración, la vida activa máxima para efectos de decoloración es la siguiente:

Concentración de la solución (% en peso)	Vida máxima de la solución
2	3 días
10	1 semana
20	1 mes
30	6 meses

Si los niveles de CTB en el agua bruta son lo suficientemente altos, que el proceso de cloración no asegure la total destrucción de bacterias, los tratamientos de choque periódicos con bisulfito son un importante suplemento para control del ensuciamiento biológico y retardar el desarrollo bacteriano.

En estos casos suelen ser bastante efectivas dosis diarias de 100-500 ppm durante 60 minutos.

3.4.4- Ensuciamientos por atascamientos.

En plantas de desalación de aguas salobres por OI, estos tipos de ensuciamiento pueden ser provocados, por la presencia en el agua de alimentación de:

- a) Algas y/o sólidos en suspensión.
- b) Materia coloidal.
- c) Contaminantes orgánicos.

- ATASCAMIENTO POR ALGAS Y/O SÓLIDOS EN SUSPENSION.

Para control del crecimiento de algas, es común el uso de sulfato de cobre. En estos casos es normal el empleo de una dosificación continua de 0,1 a 0,5 mg/l, con la

precaución de mantener en la corriente de alimentación un pH suficientemente bajo para prevenir precipitaciones de hidróxido de cobre.

Como prevención al atascamiento de los módulos de OI, así como para protección de la bomba de alta presión y demás líneas, equipos y componentes del sistema de OI, frente a la presencia de sólidos en suspensión en la corriente de alimentación. En general es suficiente con la microfiltración, a base de cartuchos de 5-10 micras, ya que los canales de paso del agua en los módulos son superiores a las 25 micras, no presentando mayores problemas el sistema de pretratamiento para desalación de aguas salobres, sobre todo si su procedencia es de pozo. Siempre que el agua de alimentación una vez pretratada y a su entrada al sistema de OI posea una turbidez inferior a 1 unidad jackson de turbidez (UJT).

- ATASCAMIENTO COLOIDAL.

Los coloides son partículas muy pequeñas, con tamaños comprendidos entre 0,3 y 1 micra, que poseen carga eléctrica negativa, y que se mantienen en suspensión debido a la repulsión entre unas y otras. La presencia de materia coloidal en el agua de alimentación, en general es debida a las siguientes circunstancias:

1) El agua bruta a tratar al pasar por estructuras geológicas arcillosas, puede arrastrar partículas coloidales en forma de silicatos de aluminio.

2) Al emplear materiales inadecuados en bombas, tuberías y/o filtros (acero al carbono, etc.), el agua de alimentación puede contener coloides derivados del hierro, como consecuencia de la corrosión.

3) Si el agua de alimentación ha sido previamente tratada con sulfato de aluminio y no ha sido adecuadamente clarificada, puede contener coloides en forma de hidróxidos de aluminio.

Mecanismo de formación.

La formación del ensuciamiento coloidal en las membranas es debida a la coagulación (desestabilización) de los mismos en los módulos, durante el proceso de OI, y posterior deposición del material coagulado sobre la superficie de las membranas. Al coagular los coloides, disminuye su concentración en la corriente de alimentación, como consecuencia de la precipitación. La capacidad de coagulación se representa por la ecuación:

$$-(dc_c/dt) = K_{ec} \times C_c \quad (Ec.9/3)$$

en la cual,

K_{ec} = Constante de estabilidad coloidal.

C_c = Concentración de coloides.

De esta forma, el sistema de pretratamiento a emplear para prevenir los depósitos coloidales en las membranas, dado que tendrá que minimizar la capacidad de coagulación de estos a la entrada del agua de alimentación al sistema de OI. Habrá de controlar previamente la constante de estabilidad (K_{ec}) y/o la concentración de coloides en el agua de alimentación (C_c).

El potencial zeta (PZ) de un agua, es una medida que da idea de la estabilidad de los coloides que esta contiene. Su valor puede obtenerse en la práctica a través de medidores comerciales.

Generalmente una concentración coloidal estable posee un potencial fuertemente negativo, superior a (-30) milivoltios.

Por otro lado la concentración de coloides presentes en un agua, puede obtenerse por medio del *índice de atascamiento de la misma*, conocido por SDI (Silt Density Index),

también denominado índice de ensuciamiento, FI (Fouling Index), y que representa la capacidad de ensuciamiento o "taponamiento" de una membrana filtrante Millipore de 0,45 micras, cuando se hace circular el agua a través de ella a una presión de 2,1 kg/cm² (30 psig). Aunque la medida del SDI, en la forma que veremos posteriormente, no determina absolutamente C_c , se ha mostrado en la práctica, que existe una buena correlación entre el valor del SDI del agua de alimentación y la capacidad que esta posee para formar depósitos coloidales en los módulos.

Existen otros métodos para la medida de la concentración coloidal, como son el de los contadores de partículas, que normalmente no se aplica al no dar una seguridad de resultados en el rango de tamaño coloidal (inferior a 1 micra) y el de los medidores de turbidez. El índice de turbidez de un agua (IT) es más general, ya que al ser función tanto del tamaño, como de la forma y concentración de todas las partículas presentes en el agua, es más útil para evaluar la capacidad de atascamiento o ensuciamiento global, por sólidos en suspensión y coloides. Al no existir una relación directa entre el IT y el ensuciamiento coloidal, el valor de este en la práctica (<1 UJT), se considera como un condicionante previo del sistema de pretratamiento antes de analizar los requisitos de este para prevención del ensuciamiento coloidal.

El SDI y el PZ son pues los parámetros a determinar, para evaluar el grado o poder de ensuciamiento coloidal.

Determinación del índice de atascamiento de un agua (12).

En la figura *F-III/20*, se muestra el equipo y los distintos componentes, para la medida del SDI de un agua.

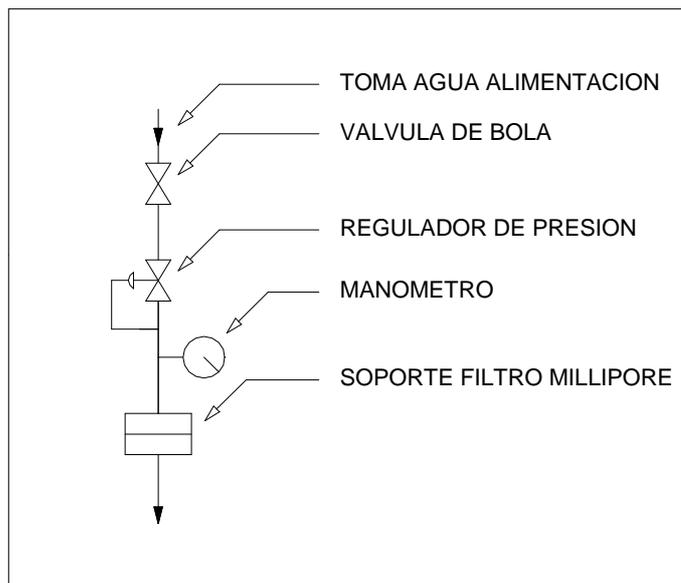


FIGURA F-III/20

El procedimiento de determinación es el siguiente:

1º) Ensamblar los distintos equipos del aparato y situar el regulador de presión a $2,1 \text{ kg/cm}^2$ (30 psig).

2º) Antes de colocar en el filtro la membrana filtrante de 0,45 micras, abrir la válvula de bola para lavar y limpiar los componentes. Medir la temperatura del agua, la cual debe permanecer aproximadamente constante durante el test ($\pm 1^\circ\text{C}$ de variación máxima admisible).

3º) Quitar la tapa del filtro y situar, con ayuda de unas pinzas la membrana filtrante en él, procurando evitar el tocarla con los dedos.

4º) Asegurarse que la membrana está bien colocada, así como las juntas de estanqueidad del filtro, antes de colocar la tapa de este.

5º) Colocar la tapa del filtro sin apretar los tornillos de ajuste de la misma. Abrir la válvula de bola para hacer una purga de aire por la tapa anterior, y una vez comience a salir agua por esta, cerrar la válvula de nuevo y terminar de apretar los tornillos de la tapa.

6º) Situar un depósito de 500 ml en la salida del aparato. Abrir la válvula de bola y poner en marcha el cronómetro, anotar el tiempo requerido para llenar el depósito anterior (t_0) y dejar la válvula abierta y el cronómetro en marcha.

7º) Anotar los tiempos requeridos para volver a llenar el depósito anterior a los 5, 10 y 15 minutos de haber iniciado el test (t_5 , t_{10} y t_{15}). Con la última anotación, volver a medir la temperatura del agua, para asegurarse que esta ha permanecido prácticamente constante durante todo el proceso, así como la presión.

8º) Una vez se ha completado el test, es conveniente guardar la membrana filtrante para futuras referencias, para examen microscópico o para análisis de los residuos.

9º) El SDI se obtiene por aplicación de la siguiente expresión:

$$\text{SDI} = (\%FA_p) / t_t = (100/t_t) \times (t_f - t_0) / t_f \quad ; \quad (\text{Ec.10/3})$$

siendo,

FA_p = Factor de atascamiento a la presión p ($p = 2,1 \text{ kg/cm}^2$).

t_t = Tiempo total del test (15 minutos) ($t_t = 15$).

t_f = Tiempo requerido para llenar los 500 ml, la última vez (a los 15 m).

$$(t_f = t_{15})$$

10º) Debe comprobarse que $t_0 < t_5 < t_{10} < t_{15}$. En caso de que esto no ocurra, se ha producido algún fallo durante la determinación, y debe desecharse la membrana filtrante y comenzar el test de nuevo.

11º) Si FA_p es superior al 75%, emplear en la *Ec.10/3*, el tiempo inferior inmediato ($t_f = t_{10}$ y $t_t = 10$).

Pretratamiento para prevenir el ensuciamiento coloidal.

Las aguas de alimentación procedentes de pozo, tienen en general valores del SDI inferiores a 3, y normalmente no requieren un pretratamiento previo para el ensuciamiento coloidal. Los casos particulares encontrados, en aguas de esta procedencia, con valores de SDI > 3, han sido motivados por las siguientes causas:

- * Pozos con intrusión de agua superficial.
- * Presencia de productos de hierro derivados de corrosión.
- * Presencia de contaminación biológica.

Las aguas superficiales por contra (lagos, ríos, depósitos) contienen grandes cantidades de materia coloidal, y presentan valores del SDI comprendidos en el rango 10-175.

Teniendo en cuenta que en desalación de aguas salobres, los datos experimentales obtenidos aportan, en función del SDI y del PZ del agua de alimentación, los siguientes niveles de ensuciamiento coloidal:

INDICE DE ATASCAMIENTO	POTENCIAL ZETA PZ (mV)	GRADO DE ENSUCIAMIENTO COLOIDAL
< 3	Entre 0 y -30 (Concentración Col. Inestable)	Escaso o nulo. No se requiere pretratamiento.
Entre 3 y 5	Entre 0 y -30 (Concentración Col. Inestable)	Moderado. Se requiere pretratamiento.
< 5	< (-30) (Concentración Coloidal estable)	Escaso o nulo. No se requiere pretratamiento.
> 5		Alto. Se requiere pretratamiento.

Los procedimientos empleados para reducir el grado de ensuciamiento coloidal, habrán de actuar de alguna de las dos formas siguientes:

I) Debilitando la estabilidad coloidal del agua bruta, esto es desestabilizando los coloides, para favorecer su coagulación, precipitación y posterior aclarado del agua de alimentación antes de su entrada al sistema de OI.

II) O por el contrario, fortaleciendo la estabilidad de los coloides, para evitar que coagulen en los módulos de OI.

La mayoría de los sistemas de pretratamiento actúan según la primera de las formas anteriores (I):

I.1) Para aguas cuyo SDI sea inferior a 6, filtración con diatomeas (hasta SDI = 4), filtración a presión sobre lecho de arena (hasta SDI = 5), filtración en medio dual arena-antracita (hasta SDI = 6).

I.2) Para aguas cuyo SDI sea superior a 6 e inferior a 50. El procedimiento que mejores resultados ofrece, es el de coagulación-floculación-filtración en línea **(13) (14)**.

El pretratamiento para liberar los coloides del agua de alimentación comienza con una desestabilización de las partículas (coagulación), mediante la adición de agentes químicos (coagulantes) que anulan las fuerzas de repulsión entre ellas, seguida de una aglomeración de los coloides "descargados" (floculación) producida como resultado de una serie de sucesivas colisiones motivadas por la coagulación. La formación de los flóculos, puede hacerse más efectiva con la adición de ciertos productos (floculantes), que aumentan su volumen, peso y sobre todo su cohesión.

Finalmente la separación sólido-líquido, de los flóculos formados y del agua, se realiza por posterior filtración.

La acción coagulante es función de la valencia del ion que posee una carga opuesta a la de las partículas, la coagulación se efectúa tanto mejor cuanto mayor sea esta valencia (teoría de Schulze-Hardy). De ahí el porqué las sales de hierro y aluminio trivalentes sean de las más usadas como agentes coagulantes, particularmente el cloruro

férrico y el sulfato de aluminio. Actualmente son preferidos los polielectrolitos catiónicos, los cuales presentan frente a los anteriores las siguientes ventajas:

- La cantidad total de flóculos formados es menor, debido a que los polielectrolitos no forman precipitados.

- Los flóculos formados son más fuertes y por tanto menos susceptibles de desgaste durante la filtración.

- No se requiere un control del pH, como sería el caso de uso del sulfato de aluminio.

- Mejor control de la dosis óptima. Para los coagulantes de hierro y aluminio esta oscila normalmente entre 10 y 30 mg/l, mientras que la de polielectrolito es 0,1 a 4 mg/l, por lo que podrá absorber mejor el medio filtrante, los excesos de polielectrolito.

Tanto si se emplean unos u otros, es muy importante que se produzca la dispersión del producto en la corriente de alimentación, de una forma rápida y homogénea. En plantas pequeñas esto se consigue con la disposición correcta de la válvula de inyección del sistema de dosificación, sin embargo en plantas grandes es necesario además disponer de un mezclador estático de montaje "en-línea", para asegurar una buena mezcla.

Para disponer de una dosis con la que se obtenga el más bajo SDI en la corriente de alimentación a la salida del filtro. Como, tanto una baja dosis como una sobredosis de electrolito, causarían un mayor SDI, y debido a que el mínimo SDI se obtiene con una dosis de polielectrolito para la cual el potencial zeta sea de 0, bastaría con regular aquella inicialmente para que el valor del PZ después de la mezcla y antes del filtro esté dentro del rango de 0 ± 2 mV., con lo cual habría el suficiente margen de seguridad y el sistema de dosificación, normalmente, no necesitaría de ajustes posteriores. En los casos en los que inicialmente se prevean cambios drásticos en la concentración coloidal y/o en la naturaleza de los coloides presentes en el agua bruta, durante la operación de la planta, será necesario un ajuste automático de la dosificación mediante regulación directa por

medio del medidor-controlador de PZ.

Para la filtración se emplean generalmente medios duales arena-antracita, diseñados para caudales de filtrado que oscilan entre 4 y 10 m³/h/m², en función del SDI y con equipo de contralavado incorporado para limpiezas periódicas con aire-agua, cuando se hayan producido presiones diferenciales del orden de 0,5 a 2 , según kg/cm² sea el tamaño del grano.

En tratamientos de agua, los filtros de arena-antracita, generalmente poseen un tamaño del grano para la arena comprendido entre 0,35 y 0,5 mm, mientras que para la antracita, este resulta comprendido entre 0,7 y 0,8 mm. En cuanto a la profundidad del medio filtrante, normalmente esta es de unos 80 cm., como mínimo, de los cuales 50 cm. estarían cubiertos con la arena y los restantes 30 cm. con la antracita.

A la hora del diseño del filtro ha de considerarse, que durante el contralavado del mismo se produce una expansión que puede incrementar el volumen del medio filtrante en un 15-25%.

I.3) Para aguas cuyo SDI es superior a 50, se emplea la tradicional coagulación-floculación-clarificación, como tratamiento previo del agua bruta antes de su entrada a la planta, donde se dispondrá a su vez de un sistema de pretratamiento a base de una filtración en línea o de una coagulación-floculación-filtración en línea, análoga a la descrita en el anterior apartado. El empleo de uno u otro tratamiento de continuación, estará en función del SDI del agua de salida del clarificado.

En cuanto a sistemas de pretratamiento que empleen la otra forma de actuación (II), teóricamente factibles ya que según la (Ec.9/3), reduciendo el valor de K_{ec} , se reduce el grado de ensuciamiento coloidal, al fortalecer la estabilidad de los coloides.

Sin embargo, de todas las técnicas posibles, encaminadas a lograr que el sistema de pretratamiento actúe en la forma de aumentar la estabilidad coloidal en el agua de alimentación, solamente se ha encontrado un método práctico, el intercambio de iones di

y trivalentes con iones sodio a través de resinas de intercambio catiónico. El ablandamiento sube al doble el espesor del coloide y su carga eléctrica efectiva. Ambos efectos suben la estabilidad coloidal y retardan la coagulación. El valor del potencial zeta sube aproximadamente al doble después del anterior ablandamiento.

Para lograr una efectiva estabilización, es necesario que el ablandamiento sea casi completo, para lo cual la dureza del efluente debe ser inferior a 5 mg/l como CaCO_3 . Por lo que es muy importante que la capacidad de ablandamiento sea adecuada y que las regeneraciones se efectúen correctamente. Debido a la dificultad de su aplicación y a su elevado coste, este procedimiento se emplea escasamente y siempre en aguas de poca salinidad.

- ATASCAMIENTO POR CONTAMINANTES ORGANICOS.

En cuanto a la prevención de ensuciamientos provocados por contaminantes orgánicos. Ya se indicó en apartados anteriores, que uno de los principales objetivos del sistema de pretratamiento, es el de evitar la presencia en el agua bruta a su entrada a la planta de aceites, grasas u otros compuestos orgánicos similares, que puedan depositarse sobre las membranas, o compuestos como disolventes o reactivos orgánicos, que puedan atacar la estructura de la membrana, a otros componentes de los módulos de OI, o a otras partes del resto de los equipos que constituyen la planta. Por lo que es fundamental, en este caso, la identificación de las sustancias contaminantes.

En estos casos los procedimientos empleados se basan en técnicas de adsorción. Siendo bastante común el procedimiento de coagulación-floculación, con posterior sedimentación y filtrado previo a la entrada del agua a la planta.

3.4.5.- Ensuciamiento por incrustaciones.

El ensuciamiento por incrustaciones es el causado por la precipitación de sales insolubles o poco solubles sobre la superficie de las membranas, al concentrarse a

medida que la corriente de alimentación se va transformando en rechazo en los módulos de OI y se hayan excedido sus límites de solubilidad.

A este efecto, conviene tener presente que aún cuando la concentración de sales en la corriente de agua de rechazo en los módulos, no haya excedido el límite de solubilidad de estas. Este puede haberse sobrepasado en la zona adyacente a la superficie de la membrana del módulo más desfavorable y por efecto de la polarización de la concentración en la capa límite.

En función del tipo de tipo de compuesto que produzca este ensuciamiento, la incrustación recibe el calificativo de "dura" (CaCO_3 , CaSO_4 , BaSO_4 , SrSO_4 , CaF_2) o "blanda" (SiO_2 , óxidos metálicos).

- MECANÍSMO DE FORMACIÓN.

El mecanismo de formación del ensuciamiento se presenta en la figura *F-III/21*, de

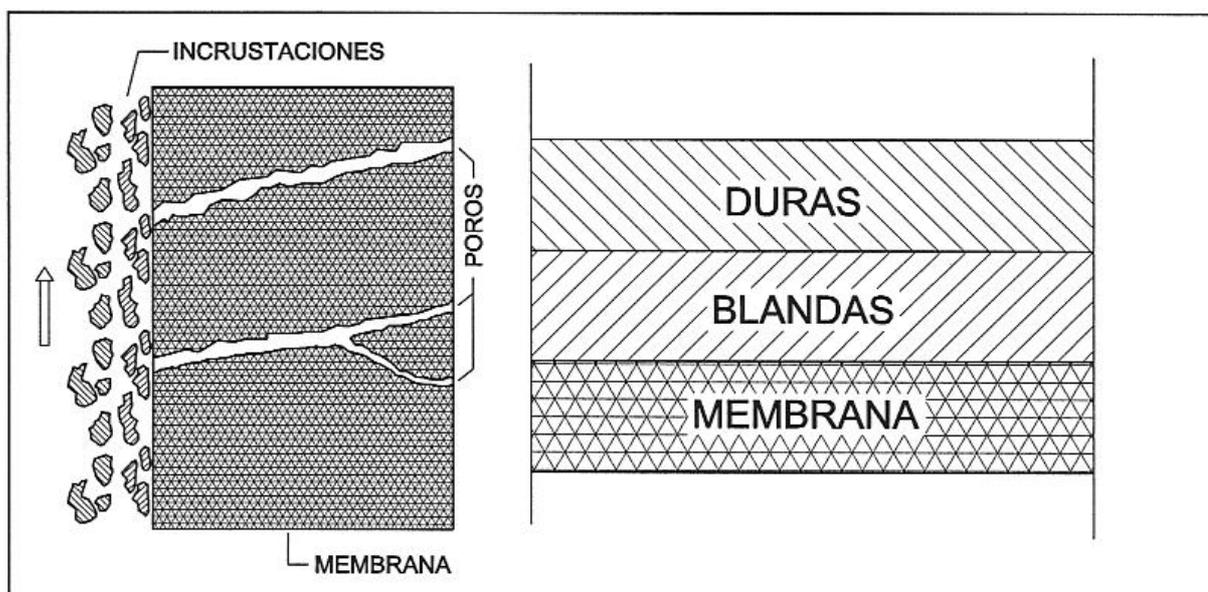


FIGURA F-III/21

ambos tipos de incrustaciones sobre la superficie de las membranas, primero las blandas la que se observa como, cuando el agua de alimentación de una planta de desalación de aguas salobres por OI es susceptible de provocar ensuciamiento por algún tipo de incrustación blanda, por no haber sido prevista esta, por no disponer de un sistema de pretratamiento adecuado o porque este ha sido diseñado exclusivamente para evitar las restantes incrustaciones, se ha encontrado en la práctica que generalmente se producen

y sobre estas las duras. Esto es debido a que se ha prestado más atención a evitar las segundas que las primeras. Cuando ambas han de recibir igual cuidado, hasta tal punto que una vez producido el ensuciamiento por incrustaciones blandas, aún cuando no se hayan sobrepasado los límites de solubilidad que ocasionan las duras, estas también se producen por efecto de la polarización de la concentración en una capa límite de superior espesor al inicialmente previsto.

- INCRUSTACIONES POR OXIDOS METÁLICOS.

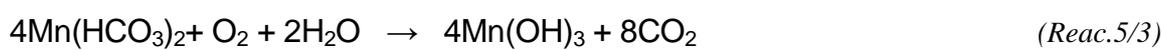
Las más comunes sales metálicas que provocan ensuciamiento en las membranas de un sistema de OI para desalación de aguas salobres, son compuestos de hierro, y/o compuestos de aluminio, y/o compuestos de manganeso (menos usual que los dos primeros), pues aún cuando así mismo exista idéntico riesgo potencial de precipitación para compuestos de otros metales, no es usual su presencia en este tipo de aguas de alimentación.

Algunos de estos compuestos, se presentan muchas veces, en el agua de alimentación en forma coloidal y ya han sido considerados en tal aspecto en el apartado correspondiente. Aquí solo vamos a tratar los compuestos que se encuentran disueltos en el agua de alimentación. Aunque la posterior precipitación de los mismos sobre la superficie de las membranas es normalmente en forma coloidal, y por tanto, a efectos de limpieza química, reciben igual tratamiento, por contra, a efectos de pretratamiento del agua de alimentación, su consideración es bien distinta.

Compuestos de hierro y manganeso.

Si el agua de alimentación presenta un cierto contenido en hierro o manganeso, en las formas iónicas respectivas Fe^{++} , Mn^{++} no afectaran al rendimiento de los módulos, como compuestos, al ser bastante solubles, y como iones divalentes que son, serán altamente rechazados por las membranas. Sin embargo existe el riesgo potencial de que el agua disponga de las condiciones adecuadas para que los iones Fe^{++} y Mn^{++} , puedan ser oxidados y pasen a sus formas Fe^{+++} y Mn^{+++} , ya que tales formas son muy poco solubles, especialmente con altos valores de pH y se produciría la correspondiente precipitación sobre la superficie de las membranas.

Las oxidaciones del hierro y del manganeso están dadas por:



Ahora bien, como estas reacciones de oxidación dependen de la concentración de iones Fe^{++} y Mn^{++} , de la concentración de oxígeno y del pH de la corriente de alimentación, para evitar estas formas de precipitación de hierro y/o manganeso, puede actuarse de alguna de las tres formas siguientes, eliminando el contenido en oxígeno del agua de alimentación, controlando el pH y el contenido en oxígeno, o reduciendo el pH del agua de alimentación hasta un valor que evite la oxidación del hierro y/o manganeso, ya que tal oxidación decrece al decrecer el valor del mismo.

El ensuciamiento por hierro ocurre más frecuentemente que el producido por manganeso, debido por un lado a que es más normal la presencia del primero en las aguas salobres típicas, y por otro a que la oxidación del hierro sucede a valores de pH más bajos.

De acuerdo a lo anterior, para prevenir este tipo de ensuciamiento, se debe procurar no sobrepasar los límites siguientes en el agua de alimentación:

Contenido en Oxígeno (mg/l)	pH	Máximo Contenido Fe ⁺⁺ (mg/l)
< 0,5	< 6	4
0,5 - 5	6 - 7	0,5
5 - 10	> 7	0,05

Para aguas de alimentación con valores del pH superiores a 7 es recomendable el empleo de ácido y/o de agentes dispersantes.

Si la concentración de ion ferroso/manganeso es muy alta será preciso favorecer la precipitación previa sobre un filtro, para lo cual se deberá favorecer la oxidación de ferroso/manganeso a férrico/mangánico mediante aire, Cl₂ o KMnO₄, de forma tal que el precipitado (hidróxidos) se produzca directamente, y luego filtrar el agua de alimentación.

La oxidación y posterior filtración puede realizarse de una vez, utilizando un medio filtrante con capacidad para oxidar, como es el caso de la "arena verde" (Greensand), que tiene la particularidad de admitir la renovación o regeneración de su capacidad oxidante, con KMnO₄.

El uso de esta técnica de oxidación debe tener en consideración, una posterior etapa de reducción para evitar el potencial riesgo de oxidación de la membrana.

Compuestos de aluminio.

Generalmente cuando el aluminio se presenta disuelto en el agua de alimentación, es en la forma de hidróxido de aluminio, cuya mínima solubilidad corresponde a un pH aproximado de 6,5-6,7, y su procedencia, prácticamente, se debe a que el agua de alimentación ha recibido un tratamiento previo de coagulación con sulfato de aluminio. Si este proceso ha sido realizado con el apropiado valor de pH, el contenido en aluminio del agua una vez filtrada debe ser inferior a 0,05 mg/l y no debe representar problema para el sistema de OI. Pero si por efecto del pH de la alimentación, precipita, lo hará en la corriente de alimentación, adquiriendo la forma coloidal y el sistema de pretratamiento

deberá diseñarse para este tipo de ensuciamiento.

- INCRUSTACIONES DE CARBONATO CÁLCICO. INDICES DE SATURACIÓN

El carbonato cálcico es probablemente una de las más comunes sales incrustantes encontradas en aguas salobres. Prácticamente casi todas ellas son potencialmente susceptibles de provocar este tipo de incrustación. Por lo que el más simple sistema de pretratamiento de una planta de desalación por OI, debe estar previsto para prevenir y controlar este ensuciamiento.

El límite de solubilidad del carbonato cálcico en agua pura que no esté en contacto con dióxido de carbono atmosférico, es de aproximadamente 15-20 mg/l. Sin embargo aunque tal compuesto no esté presente en el agua de alimentación, puede esperarse una probable incrustación del mismo desde el instante que exista una cierta concentración de iones calcio y bicarbonato, sobre todo con valores de pH superiores a 7.

Al producirse la concentración de sales en el sistema de OI, con la transformación de la corriente de alimentación en rechazo, el equilibrio existente entre carbonatos y bicarbonatos puede desplazarse hacia los primeros, ya que el rechazo de las membranas al CO₂ es prácticamente nulo. El dióxido de carbono pasa a través de las membranas al producto, subiendo el pH de la corriente de rechazo y provocando precipitación de CaCO₃ al saturarse la concentración sobre la superficie de la membrana.

Los criterios usados en la práctica para determinar la tendencia a la formación de incrustaciones de CaCO₃ de un agua son el *índice de saturación de Langelier*, LSI (Langelier Saturation Index) y el *índice de estabilidad de Stiff y Davis*, S&DSI (Stiff and Davis Stability Index), el primero de ellos se aplica a aguas cuya contenido de STD sea de hasta 10.000 mg/l, y el segundo para aguas de contenido superior al anterior. El cálculo de los mismos se indica en posteriores apartados de este capítulo.

Tanto en un caso como en otro, la tendencia se manifiesta por el signo de ambos índices, si resultan negativos no hay tendencia a la precipitación y en caso contrario la

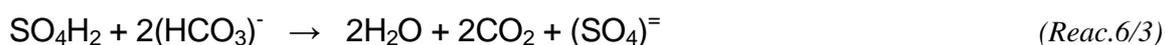
hay (índices positivos).

En consecuencia si el LSI o el S&DSI del concentrado o agua de rechazo, según el caso, fuesen ≥ 0 , el sistema de pretratamiento debe estar previsto para hacer frente a este tipo de incrustación.

Los procedimientos empleados consisten:

* Adición de anti-incrustantes (inhibidores de incrustación), con control del nivel de recuperación de la planta ya que solo es recomendable este procedimiento hasta valores del LSI, en el concentrado, de aproximadamente (+2) – (+2,5) o del S&DSI de (+1,5) – (+2).

* Adición de ácido. Es el más empleado y consiste en ajustar el pH de la alimentación, de forma tal que el índice de saturación del rechazo sea negativo (de -0,1 a -0,2). Normalmente se utiliza ácido sulfúrico por razones económicas, y en los casos donde puedan existir problemas de incrustaciones de CaSO_4 , ácido clorhídrico. La adición de ácido al agua de alimentación, produce una reacción que transforma parte del contenido total en ion bicarbonato a CO_2 , produciendo el correspondiente descenso en el valor del pH:



Generalmente es suficiente con dosificar una cantidad de ácido para mantener un pH en la alimentación en torno a 5,5-6,5.

* Empleo de sistemas de ablandamiento del agua de alimentación por intercambio iónico calcio-sodio. Este procedimiento, aún siendo más simple y seguro que el de adición de ácido, sobre todo en plantas pequeñas, debido al costo que su instalación requiere y al consumo de sal, está prácticamente restringido a plantas inferiores a los 10-20 $\text{m}^3/\text{día}$ de

producción y en las que el agua de alimentación posea una dureza total inferior a 300 mg/l como CaCO_3 .

- INCRUSTACIONES DE SULFATOS.

Cuando se diseñan plantas de desalación de aguas salobres por OI, debe estar previsto que sales como sulfatos de calcio, bario y/o estroncio, pueden precipitar sobre la superficie de las membranas, si este tipo de incrustación no está adecuadamente controlada. Sobre todo el sulfato cálcico, que es de todos ellos, el más común a todo tipo de aguas. Los iones bario y estroncio, normalmente no están presentes en la mayoría de las aguas, pero si lo están aunque sea en concentraciones tan pequeñas como 0,1 ppm para el bario, o 10 ppm para el estroncio, pueden ser suficientes para causar problemas.

La predicción de precipitación de los compuestos anteriores, cuando están presentes en el agua de alimentación, se hace por comparación entre el producto iónico (PI) del agua de rechazo y su producto de solubilidad (K_s). De tal forma que, obtenidos estos según el procedimiento que se detalla en los apartados siguientes de este Capítulo, sucede que si:

- . $PI > K_s$, existe precipitación (solución sobresaturada).
- . $PI < K_s$, la solución del rechazo no está saturada.
- . $PI = K_s$, la solución está saturada y en equilibrio.

Siendo generalmente recomendable que $PI \leq 0,8K_s$, para evitar cualquier riesgo de precipitación. En caso contrario el sistema de pretratamiento debe estar previsto para evitar la incrustación.

El procedimiento más empleado en la práctica consiste en la dosificación de anti-incrustantes a la corriente de alimentación, ya que con ellos puede llegarse a saturaciones del orden de hasta 2 - 3 K_s para el sulfato cálcico y 40 - 50 K_s para el sulfato

de bario y el sulfato de estroncio. Controlando la recuperación del sistema para no sobrepasar los límites anteriores.

- INCRUSTACIONES DE FLUORURO CÁLCICO.

Es inusual que este compuesto esté presente en las aguas salobres.

En el caso de que así ocurra, será en pequeñas cantidades, y el sistema de pretratamiento deberá estar previsto también para este posible tipo de incrustación, cuando el PI en la corriente de rechazo sea superior a 4×10^{-11} .

En este caso también, el procedimiento a emplear es la dosificación de anti-incrustantes en la corriente de alimentación, y controlar la recuperación del sistema, para que el valor de PI en el rechazo sea como máximo de hasta 4×10^{-9} .

- INCRUSTACIONES DE SILICE.

La sílice disuelta (SiO_2) es un compuesto que está presente en casi todas las aguas salobres.

Cuando en la corriente de rechazo, debido al efecto de concentración, la SiO_2 se encuentra sobresaturada, puede polimerizar para formar sílice coloidal (insoluble) o sílice en estado gelatinoso, provocando ensuciamiento sobre la superficie de las membranas, en el primer caso del tipo "atascamiento" y en el segundo incrustación "blanda".

La concentración máxima admisible de SiO_2 , en la corriente de rechazo de un sistema de OI, se obtiene de la forma que posteriormente se indica en otro apartado de este Capítulo. Sus cálculos están basados sobre la literatura disponible acerca de la solubilidad de la sílice amorfa.

En agua pura a 25°C , la solubilidad de la sílice amorfa tiene su límite en torno a los 100 mg/l como SiO_2 . La solubilidad varía linealmente con la temperatura (T), desde valor

0 para $T = 0^{\circ}\text{C}$ al valor 160 mg/l como SiO_2 , para $T = 40^{\circ}\text{C}$. En soluciones a pH neutro la única especie disuelta es el ácido silícico. La solubilidad de la sílice amorfa es mayor en soluciones alcalinas con pH superiores a 8, que en soluciones ácidas o neutras, lo cual es principalmente debido a la ionización del ácido silícico.

Los efectos de la presencia de otros iones sobre la solubilidad de la sílice, no están conocidos completamente. Sin embargo esta parece ser independiente de la fuerza iónica y sin embargo puede decrecer fuertemente en presencia de óxidos metálicos debido a la formación de silicatos, sobretodo en presencia de aluminio, probablemente por la formación del muy insoluble silicato de aluminio.

Los datos prácticos muestran, que la operación de sistemas excediendo los límites teóricos anteriores en la corriente de rechazo, aún cuando en algunos casos, incluso con concentraciones de 160 mg/l a 20°C no ha habido problemas, comportamiento no comprendido totalmente y que puede estar relacionado con la presencia de otras sustancias en el agua, la mayoría de ellos han experimentado problemas de incrustación. Por lo que es recomendable no sobrepasar los límites anteriores, ya que este tipo de ensuciamiento, una vez producido, es de difícil solución.

El método de pretratamiento, más factible en la práctica, es pues el de controlar la recuperación de la planta, en función de la temperatura y pH del rechazo, para no llegar en este a concentraciones que sobrepasen los límites teóricos.

En los casos en los que el límite se exceda, por problemas de rentabilidad, sobre todo en plantas grandes, los sistemas de pretratamiento empleados son:

- * Aumentar la temperatura del agua de alimentación, teniendo presente en el diseño del sistema el correspondiente aumento del paso de sales (Capítulos 4 y 5).

- * En función del pH del agua de aporte, aumentar o disminuir este, teniendo en cuenta además de lo indicado para el sistema anterior, la posibilidad de precipitación de otras sales como el CaCO_3 , con el nuevo valor de pH.

* Otro procedimiento de actuación sería reduciendo la concentración de sílice disuelta en el agua de alimentación. Esta puede reducirse hasta un 50% mediante ablandamiento previo del agua bruta con cal y adición de cloruro férrico y aluminato sódico en el clarificador. Este procedimiento solo es práctico para grandes sistemas.

* Finalmente existen en la actualidad ciertos tipos de dispersantes, que convenientemente dosificados en la corriente de alimentación, admiten concentraciones de sílice en la corriente de rechazo de hasta 200-250 mg/l. Si bien su alto coste restringe su uso a aplicaciones específicas, en las que su rentabilidad resulte atractiva.

3.4.6.- Índices de saturación. Determinaciones.

- INDICES DE SATURACIÓN DEL CARBONATO CÁLCICO (15) (16).

Recordemos que, según se ha visto en el apartado anterior, los criterios usados en la práctica para determinar la tendencia a la formación de incrustaciones de CaCO_3 , en una planta de desalación por OI, son el índice de saturación de Langelier (LSI) y el índice de estabilidad de Stiff y Davis (S&DSI), el primero de ellos aplicado a rechazos cuyo contenido de STD sea de hasta 10.000 mg/l, y el segundo para aquellos cuyo contenido sea superior al anterior.

Para el cálculo de los índices anteriores, en la corriente de rechazo de una planta de desalación de aguas salobres por OI, es preciso establecer una estimación previa de dicha corriente, que nos sirva de base para las determinaciones que correspondan.

A este efecto, se hacen las siguientes consideraciones:

1) La temperatura del agua de rechazo es igual a la del agua de alimentación, y estará comprendida entre 10 y 30°C (rango natural de temperaturas de las aguas salobres de la región canaria).

2) El pH del agua de rechazo es inferior a 8,3. Lo que equivale por un lado, a considerar el pH de la alimentación inferior a 8. Y por otro a considerar la alcalinidad total ($[\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-]$), debida prácticamente a los iones bicarbonato.

3) Comportamiento ideal de la membrana, en cuanto a rechazo de sales se refiere. Lo que equivale a considerar que el porcentaje de rechazo para el CO_2 es del 0%, y para el resto de compuestos presentes en la alimentación es del 100%.

Esta tercera consideración, que asume un comportamiento teórico de la membrana, aunque irreal al ser bastante conservativa, en la práctica no lo es tanto, desde el punto de vista de análisis de posibles incrustaciones, si se tiene en cuenta que por efecto de la polarización de la concentración, sobre la superficie de la membrana del módulo más desfavorable hay una concentración de sales superior a la de la corriente de rechazo.

Determinación del índice de Langelier.

Para el cálculo del LSI del rechazo, se procede a las siguientes determinaciones previas:

1^a) A partir de la tercera consideración del apartado anterior:

$$* (\text{CO}_2)_r = (\text{CO}_2)_p = (\text{CO}_2)_a \quad (\text{Ec.11/3})$$

$$* (\text{STD})_r = (\text{STD})_a \times \text{FC} \quad (\text{Ec.12/3})$$

$$* [\text{Ca}^{2+}]_r = [\text{Ca}^{2+}]_a \times \text{FC} \quad (\text{Ec.13/3})$$

$$* [\text{HCO}_3^-]_r = [\text{HCO}_3^-]_a \times \text{FC} \quad (\text{Ec.14/3})$$

$$\text{siendo: } \text{FC} = 1 / (1-R) \quad (\text{Ec.15/3})$$

- . FC = Factor de concentración del sistema de OI.

- . R = Recuperación del sistema.

- . (CO₂) = Concentración de CO₂ en mg/l como CO₂.

- . (STD) = Concentración de sales totales disueltas en mg/l.

- . [Ca²⁺] = Concentración de iones calcio en mg/l como CaCO₃.

- . [HCO₃⁻] = " " " bicarbonato " " " .

- . a = alimentación.

- . r = rechazo.

- . p = producto.

2^a) Teniendo en cuenta la segunda de las consideraciones del apartado anterior, el valor del pH del rechazo, puede obtenerse a partir de la relación alcalinidad/dióxido de carbono libre, [HCO₃⁻]_r/(CO₂)_r, y por medio del gráfico de la figura *F-III/22*, o bien a través de:

$$\text{pH}_r = 6,3 + \log\{[\text{HCO}_3^-]_r/(\text{CO}_2)_r\} \quad (\text{Ec.16/3})$$

3^a) Cálculo de los parámetros de saturación p-[Ca²⁺]_r y p-[HCO₃⁻]_r, a partir de [Ca²⁺]_r y [(HCO₃)_r] respectivamente, usando el gráfico de la figura *F-III/23* o a través de:

$$* \text{p-}[\text{Ca}^{2+}]_r = \log(10^5/[\text{Ca}^{2+}]_r) \quad (\text{Ec.17/3})$$

$$* \text{p-}[\text{HCO}_3^-]_r = \log[5 \times 10^4/(\text{HCO}_3^-)_r] \quad (\text{Ec.18/3})$$

4ª) Cálculo del parámetro de saturación C, a partir de la temperatura y de $(STD)_r$, usando el gráfico de la figura F-III/24.

Para cálculos analíticos puede ser obtenido aproximadamente, aplicando la siguiente ecuación:

$$C = \{[\log(STD)_r - 1] / 10\} - [13,12 \times \log(T + 273,15)] + 34,46. \quad (Ec.19/3)$$

Para valores de $(STD)_r$ de hasta 6.000 mg/l.

Para valores superiores ($6.000 < (STD)_r \leq 10.000$), tomar:

$$C((STD)_r) = C(6.000). \quad (Ec.20/3)$$

En la que:

. T = Temperatura en °C.

5ª) Cálculo del pH de saturación del agua de rechazo, a partir de los parámetros anteriores, por aplicación de:

$$pH_{s_r} = p-[Ca^{2+}]_r + p-[HCO_3^-]_r + C \quad (Ec.21/3)$$

Finalmente, a partir del valor del pH previsto para el rechazo y del pH de saturación de este, se obtiene el índice de saturación de Langelier por la relación:

$$LSI = pH_r - pH_{s_r} \quad (Ec.22/3)$$

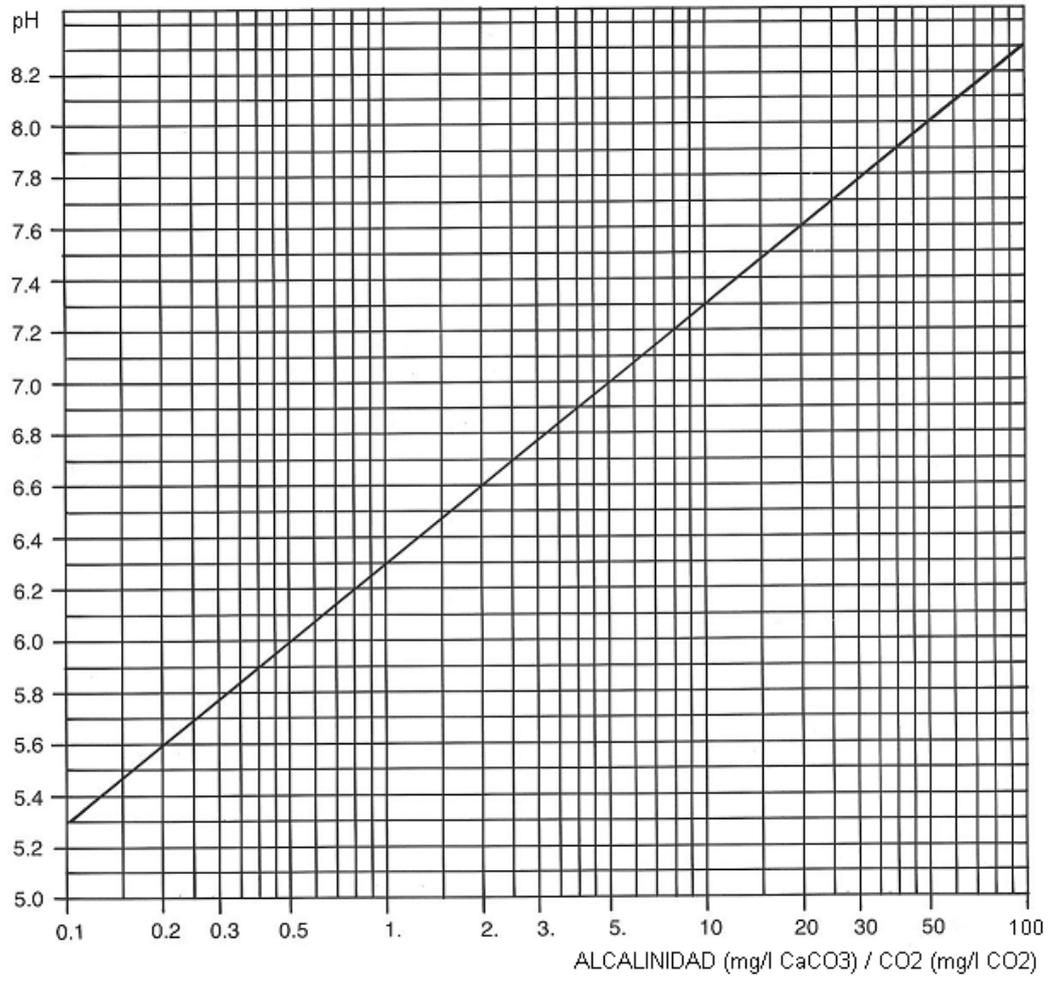


FIGURA F-III/22

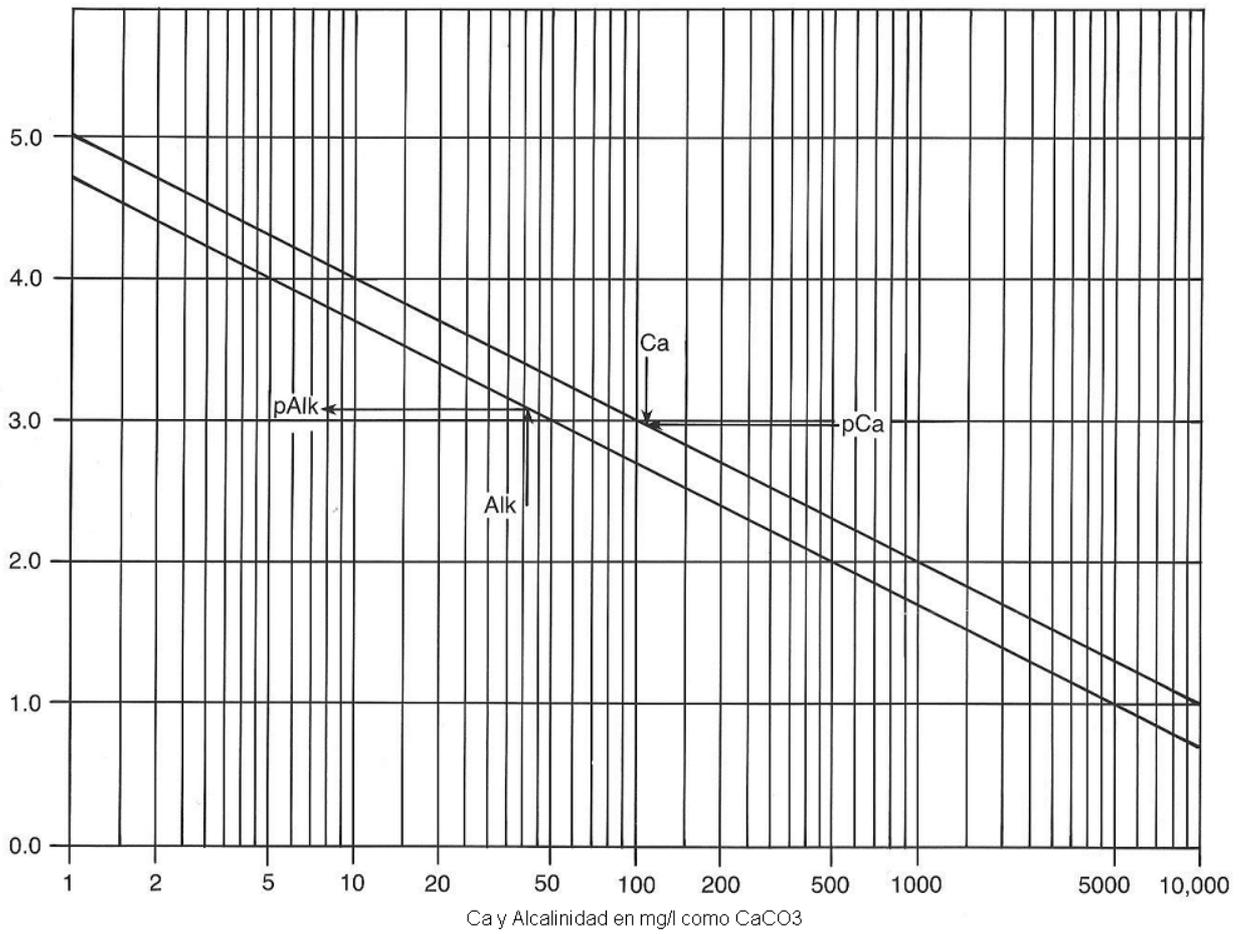


FIGURA F-III/23

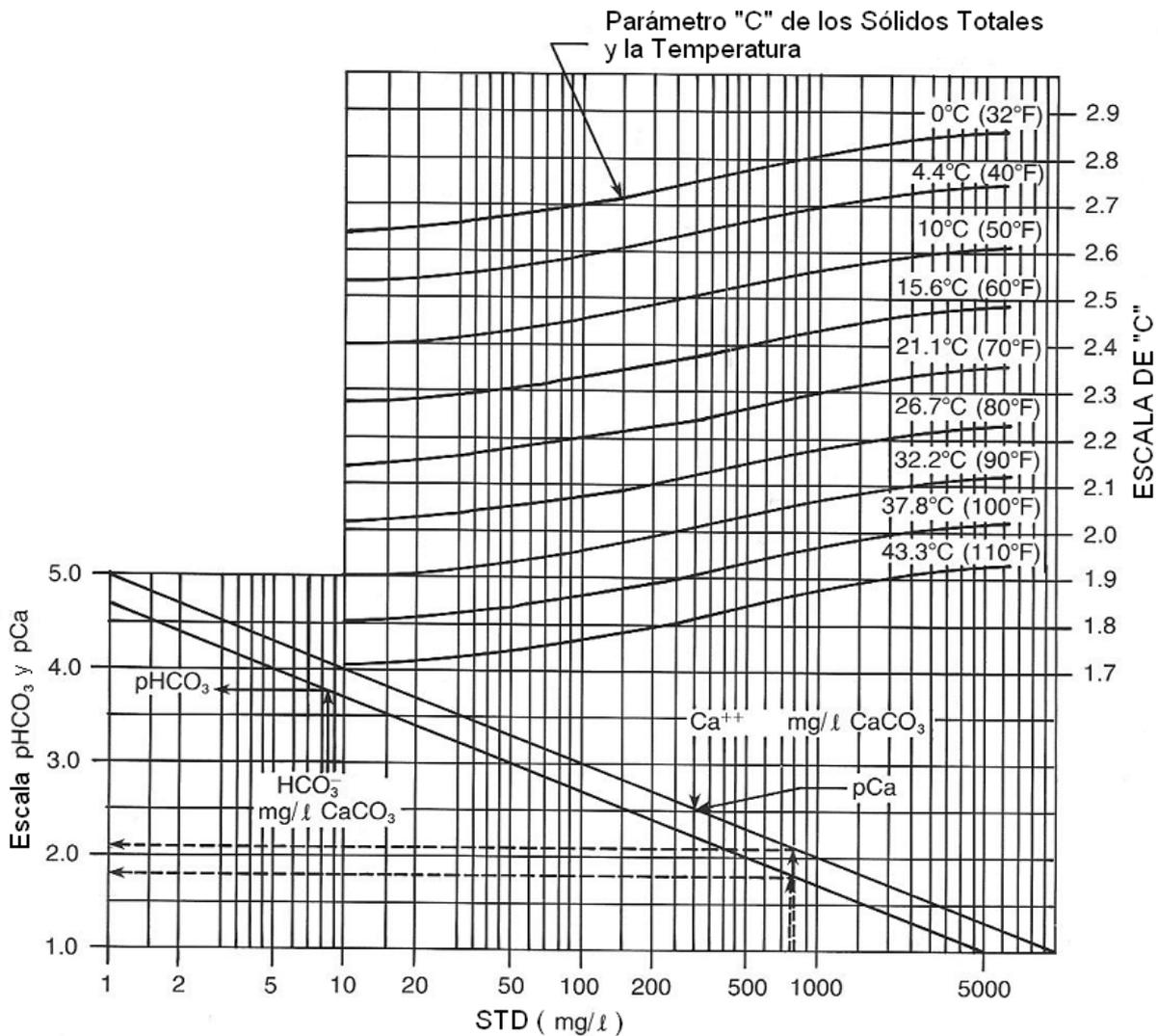


FIGURA F-III/24

Determinación del índice de Stiff y Davis.

Para aguas de rechazo cuyo contenido en STD sea superior a 10.000 mg/l, el índice de saturación de Langelier es demasiado conservativo, ya que si observamos en el gráfico de los cálculos anteriores, a partir de 6.000 mg/l de STD, el valor del parámetro C depende solo de la temperatura.

En estos casos se recurre a la determinación del S&DSI, cuya única variación con respecto al LSI, es el de sustituir C por otro parámetro K, denominado constante de fuerza

iónica. Siendo en este caso:

$$pH_{s_r} = p-[Ca^{2+}]_r + p-[HCO_3^-]_r + K \quad (Ec.23/3)$$

$$S\&DSI = pH_r - pH_{s_r} \quad (Ec.24/3)$$

Calculados previamente, en la forma indicada en el apartado anterior, los parámetros $p-[Ca^{2+}]_r$ y $p-[HCO_3^-]_r$, y el valor de pH_r . Para obtener K, hay que determinar la fuerza iónica de rechazo a partir de:

$$FI_r = FI_a \times FC \quad (Ec.25/3)$$

Siendo FI_a = Fuerza iónica del agua de alimentación.

$$FI_a = \frac{1}{2} \sum m_i (z_i)^2 \quad (Ec.26/3)$$

m_i = concentración molal del ion i en la alimentación (mol/kg).

z_i = carga iónica del ion i.

siendo a su vez:

$$m_i = c_i / [1000Pm_i(10^6-STD_a)/10^6] \quad (Ec.27/3)$$

c_i = concentración del ion i en la alimentación en mg/l como ion (mg/l≈ppm).

Pm_i = Peso molecular del ión i.

STD_a = Sólidos totales disueltos en la alimentación (mg/l).

Calculada la fuerza iónica del rechazo (FI_r), se obtiene el parámetro K que le

corresponde, para la temperatura de operación, a partir del gráfico de la figura F-III/25 .

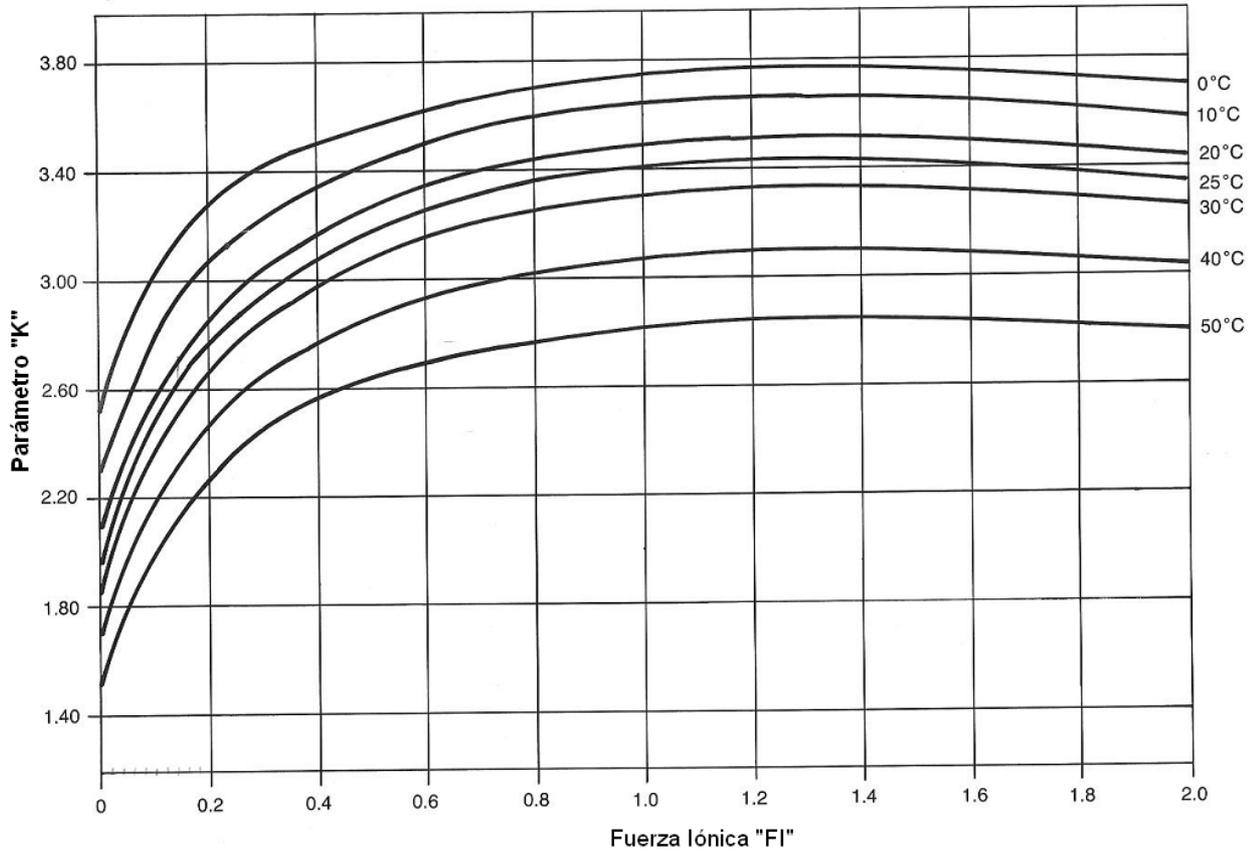


FIGURA F-III/25

Para cálculos analíticos el parámetro K, para aguas salobres, puede ser obtenido aproximadamente, a través de las siguientes expresiones:

Para T=0°C:

$$K_{0^{\circ}} = 1,5861 (FI_r)^3 - 5,3283 (FI_r)^2 + 4,9022 (FI_r) + 2,52. \quad (Ec.28/3)$$

Para T=10°C:

$$K_{10^{\circ}} = 1,3944 (FI_r)^3 - 4,8733 (FI_r)^2 + 4,8189 (FI_r) + 2,28. \quad (Ec.29/3)$$

Para T=20°C:

$$K_{20^{\circ}} = 1,4389 (FI_r)^3 - 5,0767 (FI_r)^2 + 5,0578 (FI_r) + 2,06. \quad (Ec.30/3)$$

Para T=25°C:

$$K_{25^\circ} = 1,5861 (FI_r)^3 - 5,4283 (FI_r)^2 + 5,2222 (FI_r) + 1,96. \quad (Ec.31/3)$$

Para T=30°C:

$$K_{30^\circ} = 1,3417 (FI_r)^3 - 4,7350 (FI_r)^2 + 4,7933 (FI_r) + 1,87. \quad (Ec.32/3)$$

Para T=40°C:

$$K_{40^\circ} = 1,2556 (FI_r)^3 - 4,5067 (FI_r)^2 + 4,6511 (FI_r) + 1,70. \quad (Ec.33/3)$$

Para T=50°C.

$$K_{50^\circ} = 1,2444 (FI_r)^3 - 4,3933 (FI_r)^2 + 4,4289 (FI_r) + 1,55. \quad (Ec.34/3)$$

Interpolando entre ellas, para valores intermedios de la temperatura.

Con el valor de K, deducimos pH_s y finalmente S&DSI.

- SATURACIÓN DE SULFATOS (17) (18).

La solubilidad de los sulfatos de calcio, bario y estroncio sube con la fuerza iónica de la solución en la que estén presentes. Así, determinada FI_r, fuerza iónica del rechazo en la forma indicada en el apartado anterior (Ec.25/3) y las concentraciones correspondientes de iones sulfato, calcio, bario y estroncio, según el caso. Para el cálculo de los productos iónicos (PI_r) y de solubilidad (K_s) de la corriente de rechazo, se procede de la forma siguiente:

1º Cálculo de molaridades:

$$A \text{ partir de, } m_i = c_i / (1000 \times Pm_i) \quad (Ec.35/3)$$

En la que, calculamos m_i (Concentración molar del ión i (moles/l)), en función de su concentración en mg/l como ión (c_i) y de su peso molecular (Pm_i).

Se obtienen las molaridades de los iones sulfato ($m_{SO_4^{2-}})_r$, calcio ($m_{Ca^{2+}})_r$, bario ($m_{Ba^{2+}})_r$ y estroncio ($m_{Sr^{2+}})_r$ en el rechazo.

2º) Cálculo de los productos iónicos:

Obtenidas las molaridades, a continuación se calculan los productos iónicos de los compuestos en el rechazo, que serán según el caso:

- Para el sulfato cálcico..... $PI_r = (m_{SO_4})_r \times (m_{Ca})_r$ (Ec.36/3)

- " " " de bario..... $PI_r = (m_{SO_4})_r \times (m_{Ba})_r$ (Ec.37/3)

- " " " de estroncio... $PI_r = (m_{SO_4})_r \times (m_{Sr})_r$ (Ec.38/3)

3º) Cálculo de los productos de solubilidad:

A partir de la fuerza iónica del rechazo, mediante los gráficos de las figuras F-III/26, F-III/27 y F-III/28, se obtienen los valores de Ks para el sulfato cálcico, de bario y/o de estroncio según el caso.

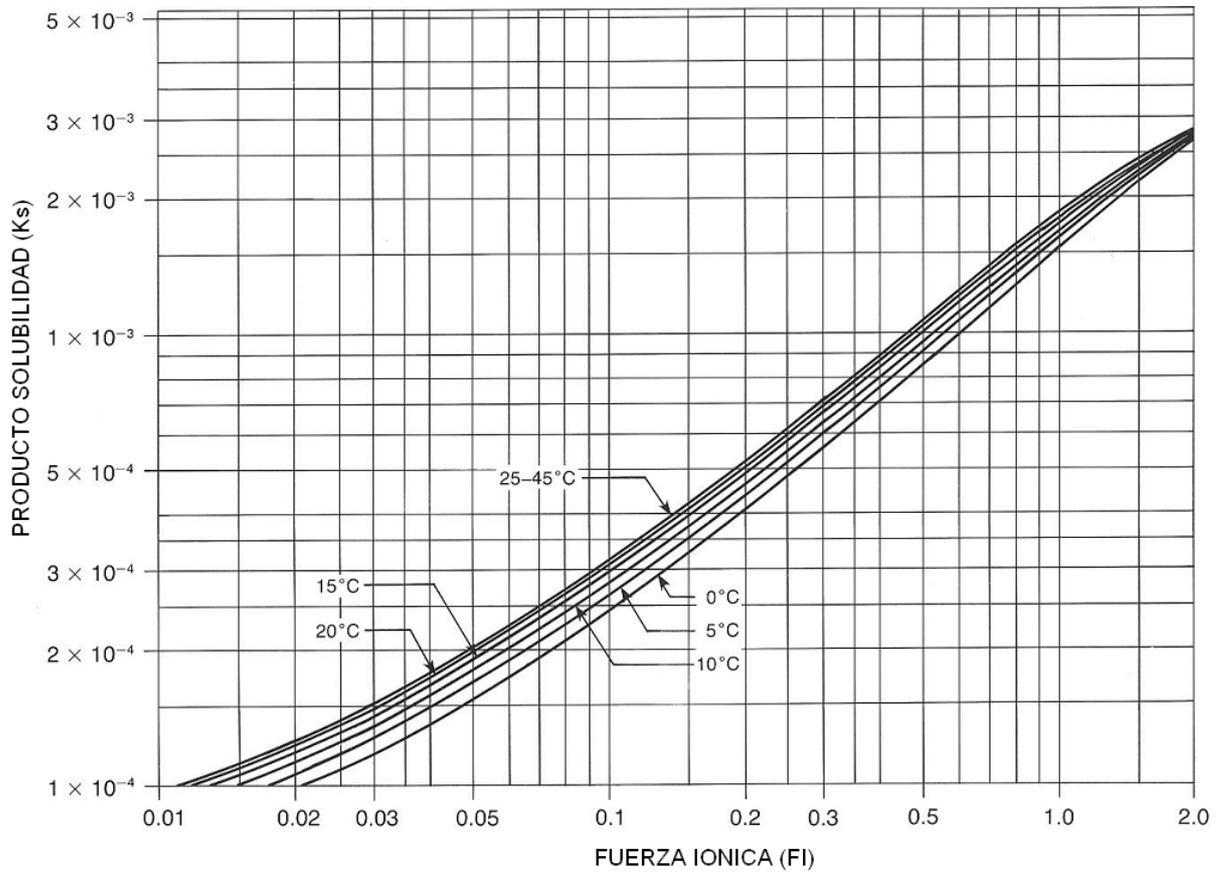


FIGURA F-III/26: $CaSO_4$

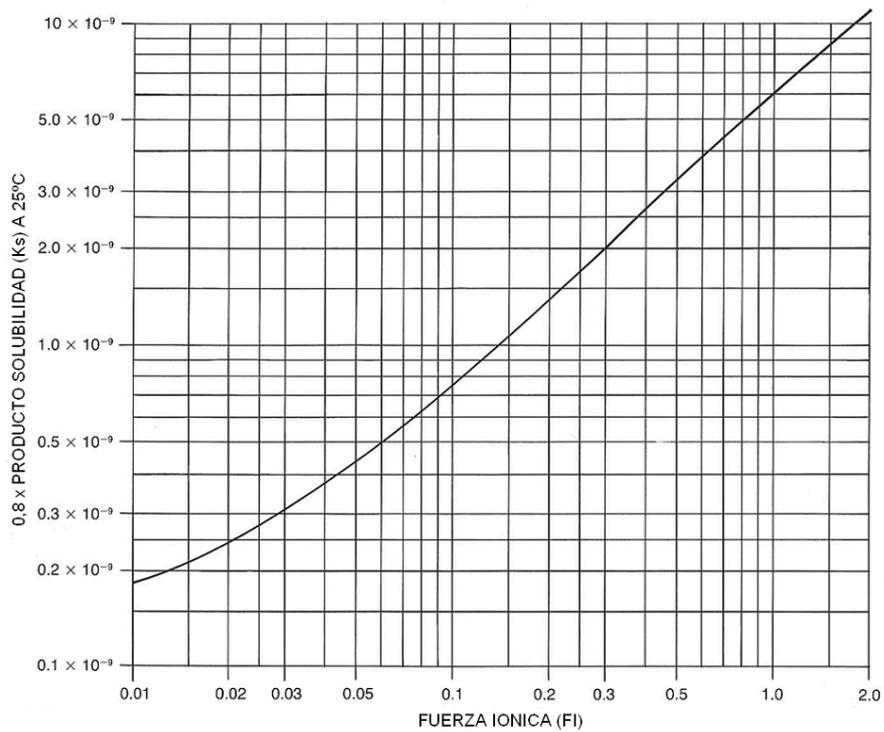


FIGURA F-III/27: $BaSO_4$

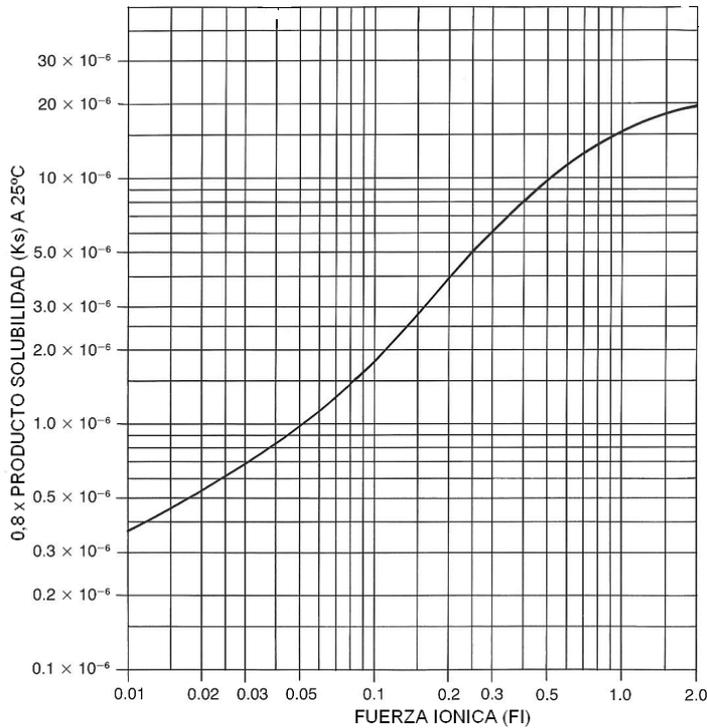


FIGURA F-III/28: SrSO₄

O bien para cálculos analíticos, valores aproximados pueden obtenerse a través de las siguientes expresiones (referidas a 25°C):

Para el sulfato cálcico: $K_s = 0,0016 (FI_r)^{(0,6742)}$. (Ec.39/3)

Para el sulfato de bario: $K_s = 0,000000007 (FI_r)^{(0,835)}$. (Ec.40/3)

Para el sulfato de estroncio: $K_s = 0,00001 (FI_r)^{(0,6916)}$. (Ec.41/3)

Finalmente, la comparación de los valores de PI_r frente a los K_s obtenidos, nos indicaría la tendencia a la precipitación:

- $0,8K_s > PI_r$ (No existe riesgo de incrustación).
- $0,8K_s < PI_r$ (Existe riesgo de incrustación).

- FLUORURO CÁLCICO (18).

Repitiendo el procedimiento anterior. A partir de la (Ec.35/3). Se obtienen las molaridades de los iones fluoruro $(m_F)_r$ y calcio $(m_{Ca})_r$, en el rechazo. Obtenidas las molaridades, a continuación se calcula el producto iónico del compuesto en el rechazo, que será:

$$PI_r = ((m_F)_r)^2 \times (m_{Ca})_r \quad (Ec.42/3)$$

A partir de la fuerza iónica del rechazo, mediante el gráfico de la figura F-III/29, se obtiene el valor del producto de solubilidad K_s (Si $PI_r > K_s$, puede ocurrir la incrustación, y se requiere por tanto un ajuste de la conversión y el pretratamiento adecuado).

Considerando poco probable la presencia de este compuesto en aguas salobres será, en todo caso, en pequeñas cantidades (< 1 ppm), y podemos asumir para cálculos analíticos que:

- $4 \times 10^{(-11)} > PI_r$ (No existe riesgo de incrustación).

- $4 \times 10^{(-11)} < PI_r$ (Existe riesgo de incrustación).

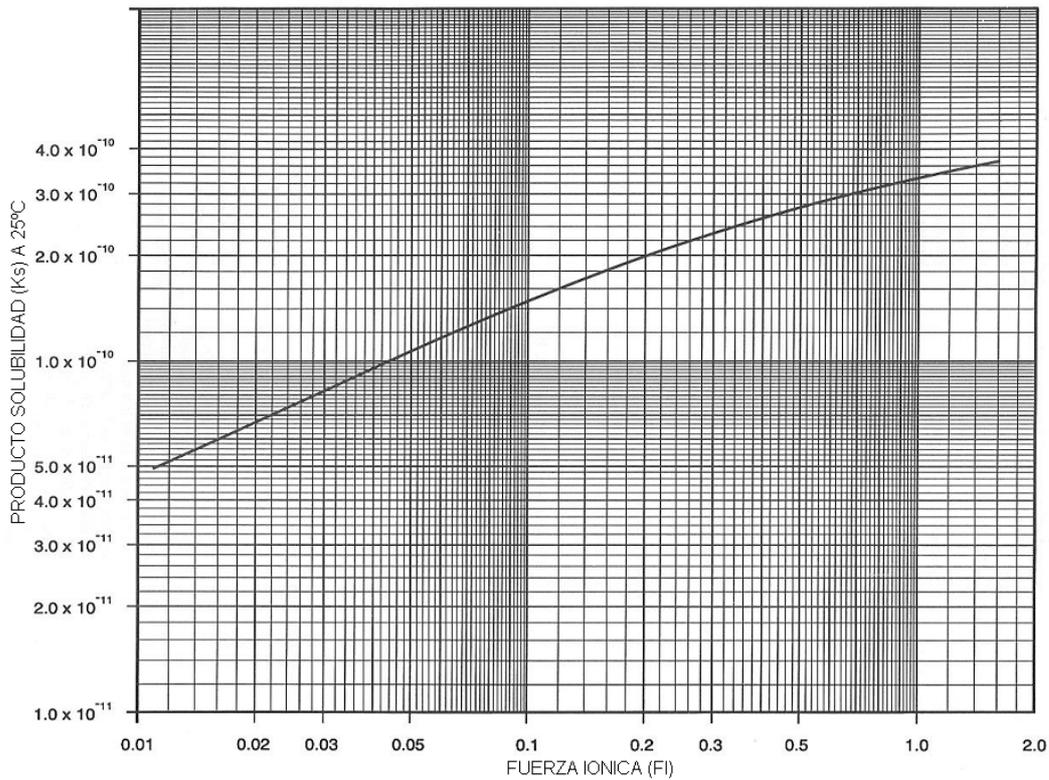


FIGURA F-III/29: CaF₂

- PREDICCIÓN DE LA FORMACIÓN DE INCRUSTACIONES DE SÍLICE (18) (19) (20).

En ausencia de anti-incrustantes específicos, la precipitación de sílice no se producirá mientras se cumpla que:

$$(\text{SiO}_2)_r \leq (\text{SiO}_2)_{\text{máx}} \quad (\text{Ec.43/3})$$

Siendo: $(\text{SiO}_2)_r = (\text{SiO}_2)_a \times \text{FC}$ (Ec.44/3)

La concentración máxima admisible de SiO₂, en la corriente de rechazo del sistema de OI, se determina a partir de:

$$(\text{SiO}_2)_{\text{máx}} = (\text{SiO}_2)_T \times C_{\text{pH}} \quad (\text{Ec.45/3})$$

En la cual, (SiO₂)_T, concentración máxima de sílice soluble en función de la temperatura, se obtiene mediante el gráfico de la figura F-III/30, o por aplicación de:

$$(\text{SiO}_2)_T = 4 T$$

(Ec.46/3)

Expresión en la que la concentración de sílice viene dada en mg/l como SiO_2 y la temperatura del agua (T) en grados centígrados.

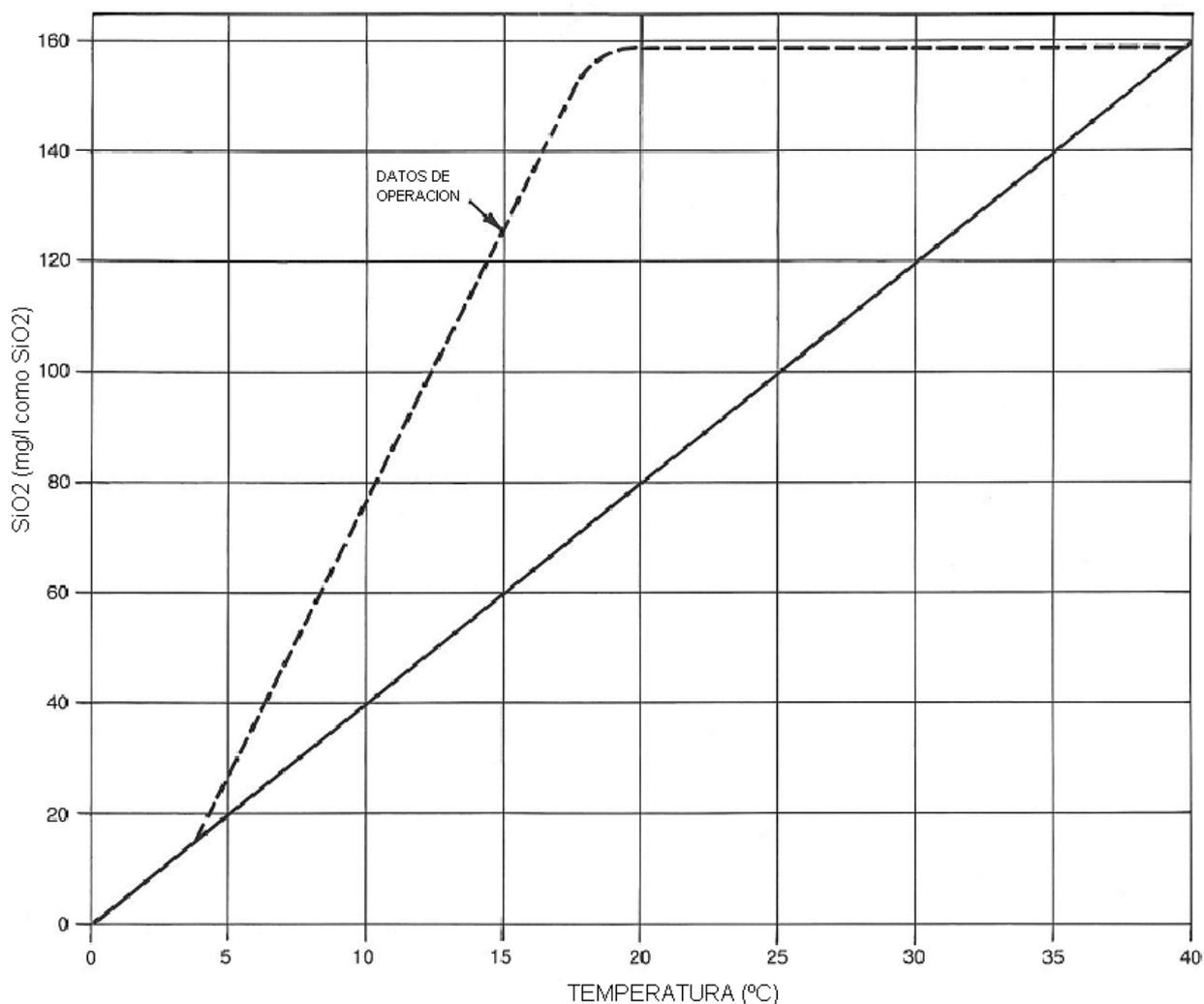


FIGURA F-III/30: EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA SOLUBILIDAD DE LA SÍLICE

C_{pH} , denominado coeficiente de pH, es un factor para corrección de los valores de $(\text{SiO}_2)_T$, en función del valor del pH del agua de rechazo (pH_r).

Obtenido pH_r de la forma indicada en el apartado "Determinación del Índice de

Langelier", el valor de C_{pH} (≥ 1) se deduce del gráfico de la figura F-III/31.

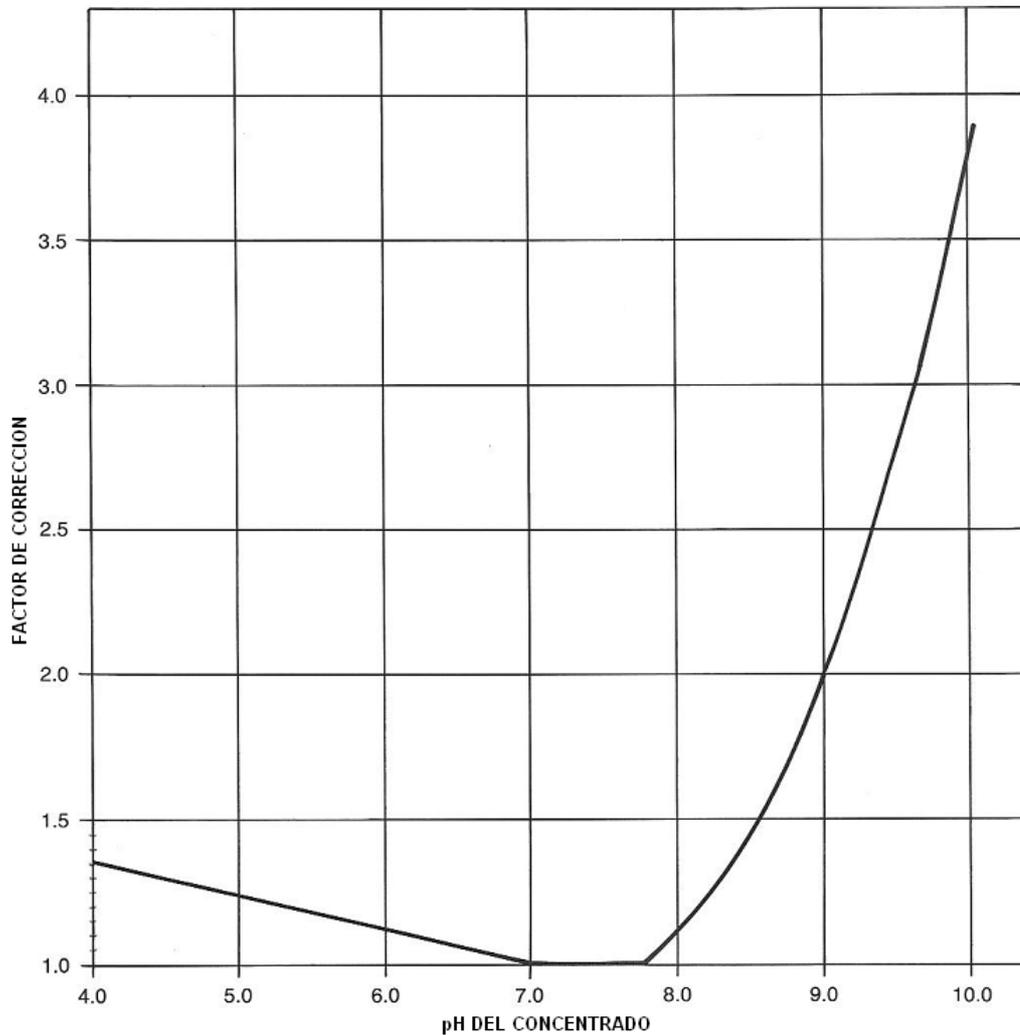


FIGURA F-III/31

Para cálculos analíticos C_{pH} puede ser obtenido aproximadamente, en función del pH_r , a partir de:

- Para $pH_r \leq 7$ $C_{pH} = 1,819 - (0,117 \times pH_r)$ (Ec.47/3)

- Para $7 \leq pH_r \leq 7,8$ $C_{pH} = 1$ (Ec.48/3)

- Para $pH_r \geq 7,8$ $C_{pH} = 0,47 + 0,0006 \times (e)^{0,87pH_r}$ (Ec.49/3)

3.4.7.- Conclusiones. Ejemplo de aplicación.

Aunque el grado de sus efectos pueda variar de una a otra, el ensuciamiento afecta a todos los tipos de membranas. Por otra parte, un tipo de ensuciamiento puede inducir a otro, o alterar la distribución del flujo en el interior de los módulos de OI, creando zonas de estancamiento que podrían provocar incrustaciones adicionales no previstas, como sería en el caso de que se produzca un ensuciamiento coloidal apreciable.

Es pues muy importante que todos los tipos de ensuciamiento posibles sean considerados, a la hora de diseñar el sistema de pretratamiento de una planta de desalación por OI. Para lo cual es fundamental disponer de toda la información necesaria acerca del tipo de agua bruta a tratar, procedencia, condiciones, etc.

APLICACIÓN PRÁCTICA.

A continuación se procede a realizar una aplicación práctica de los fundamentos teóricos anteriores. En este caso partimos del agua de alimentación de la planta de desalación cuyos datos se aportan a este trabajo de tesis (Capítulo 6, apartado 6.1).

Datos iniciales.

Según el mencionado apartado. 6.1, las condiciones del agua bruta a tratar aportan los siguientes datos de partida:

- Análisis químico (mg/l como ión):

Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SiO ₂	Fe	STD
96.04	139.68	955.00	32.30	668.70	695.19	382.42	962.93	35.00	0.10	3968

La fuente de procedencia es pozo. La temperatura, aproximadamente constante durante el año, es de 22°C. El valor del pH es de 7,8. El índice de atascamiento SDI es de 2,7.

Tipos de ensuciamientos previstos.

Por ser agua salobre procedente de pozo con un SDI de 2,7, en principio, no es previsible ensuciamiento biológico ni coloidal y según el apartado correspondiente, será suficiente con una microfiltración. En este caso se emplean cartuchos calibrados para 5 micras y al objeto de prolongar la vida útil de estos, se dispone de una filtración previa a presión sobre lecho de arena.

Veamos a continuación las posibles incrustaciones. Para evitar la presencia de óxidos metálicos, los materiales a emplear en contacto con el agua serán inoxidable AISI-316, PVC, o materiales plásticos similares. El contenido total en hierro (0,1 mg/l), es admisible y no requiere un tratamiento previo.

Las otras posibles incrustaciones serán de carbonato cálcico, sulfato cálcico y sílice. Teniendo en cuenta que sobre las dos primeras podremos actuar, la que nos limitará el nivel de recuperación de la planta, será la de sílice (no se utiliza un anti-incrustante específico para este menester).

Sílice.

Según las consideraciones del apartado correspondiente, a partir de los datos iniciales, se obtienen:

$$* [\text{HCO}_3^-]_a = 668,7 \times 0,819 = 547,7 \text{ mg/l como CaCO}_3.$$

* $(\text{CO}_2)_a$, aplicando la (Ec.16/3) a la alimentación:

$$\text{pH}_a = 6,3 + \log\{[\text{HCO}_3^-]_a / (\text{CO}_2)_a\}, \text{ de donde:}$$

$$(\text{CO}_2)_a = [\text{HCO}_3^-]_a / 10^{(\text{pH}_a - 6,3)} = 547,7 / 10^{1,5} = 17,3 \text{ mg/l CO}_2.$$

* $(\text{SiO}_2)_T = (\text{SiO}_2)_{22}$, según el gráfico correspondiente o aplicando la (Ec.46/3) :

$$(\text{SiO}_2)_T = 4 T = 4 \times 22 = 88 \text{ mg/l SiO}_2.$$

A partir de los valores anteriores, iniciamos el tanteo de varias recuperaciones posibles, aplicando el siguiente procedimiento de cálculo:

1) Con la recuperación tanteada (R), obtenemos FC aplicando la (Ec.15/3) :

$$\text{FC} = 1 / (1-R).$$

2) Con FC obtenemos $(\text{SiO}_2)_r$ y $[\text{HCO}_3^-]_r$, a partir de:

$$(\text{SiO}_2)_r = (\text{SiO}_2)_a \times \text{FC}. \quad (\text{Ec.44/3})$$

$$[\text{HCO}_3^-]_r = [\text{HCO}_3^-]_a \times \text{FC}. \quad (\text{Ec.14/3})$$

3) Con $(\text{CO}_2)_a$, obtenemos $(\text{CO}_2)_r$, a partir de la (Ec.11/3)

$$(\text{CO}_2)_r = (\text{CO}_2)_p = (\text{CO}_2)_a = 17,3 \text{ mg/l}.$$

4) Con $(\text{CO}_2)_r$ y $[\text{HCO}_3^-]_r$, obtenemos pH_r aplicando la (Ec.16/3)

$$\text{pH}_r = 6,3 + \log\{[\text{HCO}_3^-]_r / (\text{CO}_2)_r\}.$$

5) A partir del valor de pH_r , según el gráfico correspondiente o aplicando (Ec.47/3), (Ec.48/3) o (Ec.49/3) , según el caso, obtenemos C_{pH} :

$$C_{\text{pH}} = 0,47 + 0,0006 \times (e)^{0,87\text{pH}_r}.$$

6) Calculado C_{pH} y con $(\text{SiO}_2)_T$, obtenemos $(\text{SiO}_2)_{\text{máx}}$ y aplicando (Ec.45/3) :

$$(\text{SiO}_2)_{\text{máx}} = (\text{SiO}_2)_T \times C_{\text{pH}}.$$

7) Comparando los valores de $(\text{SiO}_2)_{\text{máx}}$ y $(\text{SiO}_2)_r$, procederemos a tantear un nuevo valor de R, de forma que de acuerdo al apartado correspondiente:

* Si $(\text{SiO}_2)_{\text{máx}} > (\text{SiO}_2)_r$, no se prevé incrustación, y por tanto el nuevo valor de R a tantear será superior al previamente tanteado.

* Si $(\text{SiO}_2)_{\text{máx}} < (\text{SiO}_2)_r$, se prevé incrustación con ese nivel de recuperación, y por tanto se reiniciará el cálculo con otro valor de R inferior al anterior.

Los valores sucesivos obtenidos aplicando el procedimiento anterior, para recuperaciones del 60, 70 y 65%, son los siguientes:

R (%)	FC	$(\text{SiO}_2)_r$ mg/l SiO_2	$[\text{HCO}_3^-]_r$ mg/l CaCO_3	pH _r	C _{pH}	$(\text{SiO}_2)_{\text{máx}}$ mg/l SiO_2
60	2,500	87,5	1369,2	8,20	1,22	107,36
70	3,333	116,7	1825,4	8,32	1,30	114,40
65	2,857	100,0	1564,7	8,26	1,26	110,90

Por lo que adoptaremos, en principio una recuperación del 65%.

Carbonato cálcico.

Comprobamos a continuación la posible incrustación de carbonato cálcico, para la recuperación adoptada del 65%, por medio de sus índices LSI o S&DSI.

Al ser, según la (Ec.2/3):

$$(\text{STD})_r = (\text{STD})_a \times \text{FC} = 11337 \text{ mg/l } (> 10.000).$$

Calcularemos el índice de estabilidad de Stiff y Davis (S&DSI).

A partir de los datos iniciales, se obtiene:

$$* [Ca^{2+}]_a = 96,1 \times 2,495 = 239,8 \text{ mg/l como } CaCO_3.$$

Por la (Ec.13/3):

$$* [Ca^{2+}]_r = 239,8 \times 2,857 = 685,1 \text{ mg/l como } CaCO_3.$$

Con lo que se procede al cálculo del S&DSI para la corriente de rechazo prevista:

1) Con los valores de $[Ca^{2+}]_r$ y $[HCO_3^-]_r$, obtenemos $p-[Ca^{2+}]_r$ y $p-[HCO_3^-]_r$, usando el gráfico correspondiente o aplicando respectivamente las ecuaciones (Ec.17/3) y (Ec.18/3):

$$p-[Ca^{2+}]_r = \log(10^5/[Ca^{2+}]_r) = \log(10^5/685,1) = 2,164.$$

$$p-[HCO_3^-]_r = \log(5 \times 10^4/[HCO_3^-]_r) = \log(5 \times 10^4/1564,7) = 1,504.$$

2) Con los datos iniciales, obtenemos las concentraciones molales iónicas de la alimentación, usando la ecuación (Ec.27/3):

$$m_i = c_i / [1000Pm_i(10^6-STD_a)/10^6]$$

mCa^{2+}	mMg^{2+}	mNa^+	mK^+	$mHCO_3^-$	mSO_4^{2-}	mNO_3^-	mCl^-
$2,4 \times 10^{-3}$	$5,8 \times 10^{-3}$	0,0417	$8,3 \times 10^{-4}$	0,011	$7,2 \times 10^{-3}$	$6,2 \times 10^{-3}$	0,0273

A partir de las cuales, se obtienen sucesivamente, las fuerzas iónicas de la alimentación y rechazo, aplicando las ecuaciones (Ec.26/3) y (Ec.25/3):

$$FI_a = \frac{1}{2} \sum m_i z_i^2 = 0,0743$$

$$FI_r = FI_a \times FC = 0,0743 \times 2,857 = 0,2123$$

3) Con el valor de FI_r , se calcula la constante de fuerza iónica (K), para la temperatura de 22 grados centígrados, usando el gráfico correspondiente (Figura F-III/25) o aplicando

respectivamente las ecuaciones (Ec.30/3) y (Ec.31/3) y sustituyendo valores:

$$K_{20^\circ} = 1,4389 (FI_r)^3 - 5,0767 (FI_r)^2 + 5,0578 (FI_r) + 2,06 = 2,9187$$

$$K_{25^\circ} = 1,5861 (FI_r)^3 - 5,4283 (FI_r)^2 + 5,2222 (FI_r) + 1,96 = 2,8629$$

Interpolando obtenemos:

$$K_{22^\circ} = 2,896$$

4) Con los valores de $p\text{-}[Ca^{2+}]_r$, $p\text{-}[HCO_3^-]_r$ y K , a través de (Ec.23/3) obtenemos pH_{s_r} . Y con este, por medio de la (Ec.24/3), el índice de estabilidad de Stiff y Davis del rechazo:

$$pH_{s_r} = 2,164 + 1,504 + 2,896 = 6,56$$

$$S\&DSI = pH_r - pH_{s_r} = 8,26 - 6,56 = +1,7 > 0$$

De cuyo valor se deduce la existencia de tendencia a la formación de incrustaciones de carbonato cálcico sobre la superficie de las membranas.

En consecuencia el agua de alimentación deberá ser acondicionada de acuerdo a los procedimientos ya indicados. Al ser su valor inferior a 2, la utilización del anti-incrustante adecuado nos permitirá mantener el nivel de conversión adoptado (65%).

Sulfato cálcico.

Según se ha visto, para determinar la posibilidad de precipitación de sulfato cálcico en el agua de rechazo, tendremos que comparar el producto iónico del rechazo (PI_r) con el producto de solubilidad (K_s).

Para evitar cualquier riesgo de precipitación, sin pretratamiento adicional alguno deberá ser $PI_r \leq 0,8K_s$. Si el valor de PI_r supera el 80% del valor de K_s , se hará necesaria

la dosificación de anti-incrustantes.

Según las ecuaciones (Ec.35/3) y (Ec.36/3) :

$$PI_r = (m_{SO_4})_r \times (m_{Ca})_r.$$

Luego, sustituyendo valores:

$$PI_r = [(2,857 \times 695,2)/(1000 \times 96,07)] \times [(2,857 \times 96,1)/(1000 \times 40,08)]$$

$$PI_r = 1,42 \times 10^{-4}$$

A continuación determinamos K_s , a partir del valor de la fuerza iónica del rechazo, obtenido en el apartado anterior ($FI_r = 0,2123$), con el correspondiente gráfico (Figura F-III/26), o bien a través de la estimación analítica aproximada (Ec.39/3) :

$$K_s = 0,0016 (FI_r)^{0,6742} = 5,627 \times 10^{-4}$$

Por lo que al ser $0,8K_s = 4,5 \times 10^{-4} > 1,42 \times 10^{-4} = PI_r$, no hay saturación de sulfato cálcico en el rechazo, y no se prevé por tanto precipitación del mismo sobre las membranas.

Operando con un nivel de recuperación del 65%, no se hace pues necesario un pretratamiento adicional para evitar este tipo de incrustación.

3.5.- Postratamientos.

El agua producto a la salida de los módulos de OI, tiene un contenido en sales que la hacen adecuada para su utilización.

Sin embargo es bastante corrosiva, teniendo un índice de Langelier negativo (pH

en torno a 5,5). Esto es debido por un lado al pH y al contenido en bicarbonatos del agua bruta, y por otro a que la concentración de CO₂ en el agua de alimentación se incorpora, prácticamente, al permeado.

El anhídrido carbónico atraviesa las membranas de OI, ya que estas son permeables a él, haciendo que el agua producida, como se ha indicado, tenga un pH aproximado de 5. Esto, sumado al bajo contenido en ión calcio y en ión bicarbonato en el agua desalada, hace que el agua sea agresiva.

Si el destino del agua producto fuese para consumo humano, teniendo en cuenta lo anterior y que las normas de potabilidad del agua aconsejan que esta tenga un pH comprendido entre 6,5 y 8,5, sería necesario corregir estas características del agua permeada.

En estos casos y por este concepto, la planta debería de disponer en la fase de postratamiento del agua producida, y a la salida de esta del depósito de equilibrio osmótico, de un tratamiento de adición de cal o reactivo similar, con objeto de mantener un pH dentro del rango permitido y que el agua producida no sea corrosiva para que no dañe las tuberías y los depósitos de almacenamiento y de distribución, evitando así los altos costos que supondría el mantenimiento de esa red.

Antes de pasar el agua producto al depósito de almacenamiento, y en el caso de ser su fin el consumo humano. De acuerdo con las normativas vigentes, sería necesario asimismo, el asegurarla a efectos sanitarios, con el fin de eliminar la formación de posibles gérmenes, bacterias y materias orgánicas en los depósitos y en las tuberías de almacenamiento y distribución. Lo que se conseguiría con la instalación en la planta y en la sección de postratamiento, de una unidad dosificadora de hipoclorito sódico como equipo de cloración.

La planta cuyos datos operacionales se han utilizado en este trabajo de tesis, dado que el destino final del agua producto es para riego agrícola (ver apartado 6.1 del capítulo 6), no dispone de acondicionamientos posteriores, ya que el pH de salida

(5-6), resulta idóneo para riegos agrícolas.

3.6.- Aditivos.

Como se ha visto en apartados anteriores (apartado. 3.4, figura *F-III/27*), en el sistema de pretratamiento, el equipo de dosificación de productos químicos, se utiliza para acondicionar el agua a tratar y esta constituido por una o varias unidades de dosificación. Cada una de ellas formada básicamente por:

- La bomba dosificadora.
- El depósito de dosificación con el aditivo que corresponda.

Las bombas dosificadoras a utilizar estarán ejecutadas en materiales compatibles con el líquido a dosificar. Generalmente se emplean dos tipos:

- Dosificadoras electromagnéticas, para caudales de dosificación pequeños y medianos.
- Dosificadoras a motor, para grandes caudales de dosificación.

En la mayoría de los casos se utilizan las electromagnéticas (*Figura F-III/32*).

Consisten en una membrana dosificadora accionada por un electroimán y sus principales características son:

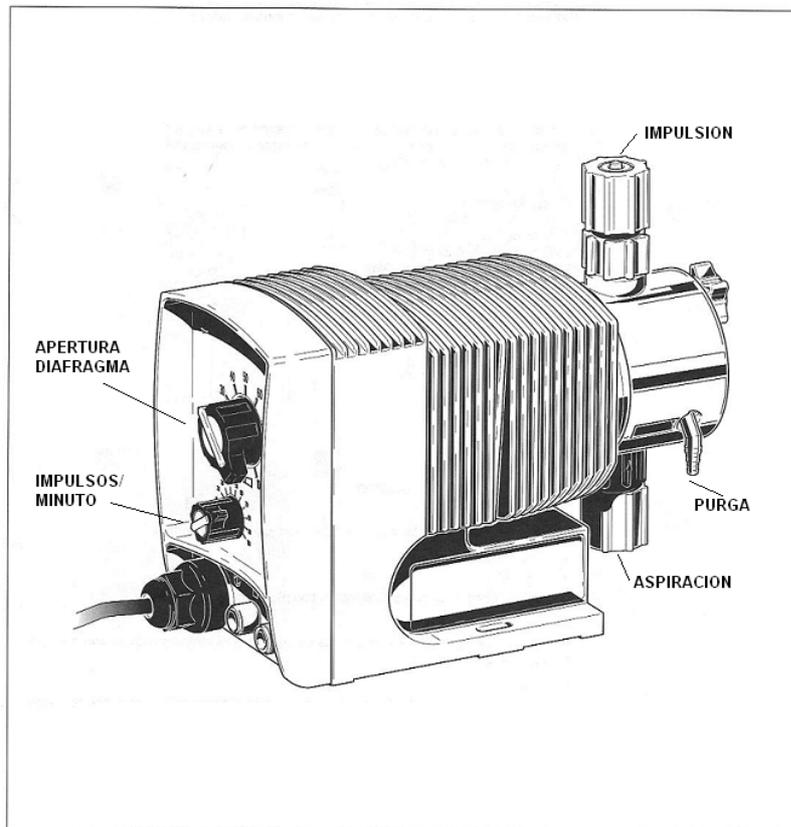


FIGURA F-III/32: DOSIFICADORA ELECTROMAGNETICA

- Control por microprocesador.
- Regulación precisa del caudal de dosificación, por porcentaje de apertura del diafragma y/o por variación de la frecuencia (impulsos/minuto).
- Alta duración, escaso mantenimiento y fácil integración en desaladoras por OI controladas por ordenador.

Los aditivos a emplear dependerán, en cada caso, de las características del agua a tratar, del tipo de membrana de OI utilizado y de las condiciones de operación de la planta.

Con el uso de las membranas TFC de poliamida que pueden operar dentro de un amplio margen de pH (p.e. 2-11 para las FT-30 de Filmtec (7)). El empleo del ácido,

como control de posibles incrustaciones de carbonato cálcico, tiende a ser sustituido por otros productos de similar función y más fácil manejo.

Forman parte de estos aditivos, los denominados anti-incrustantes o inhibidores de incrustación, utilizados para control de las incrustaciones de carbonato cálcico, sulfatos de calcio, bario y estroncio, fluoruro cálcico, sílice y óxidos metálicos.

Los anti-incrustantes tienen un efecto “umbral” o dispersante, lo que significa que su uso implica una menor formación de microcristales incrustantes, y por tanto que una menor cantidad de precipitados se formarán sobre la superficie de la membrana.

El primer anti-incrustante empleado en desalación por OI, y el más utilizado ha sido el hexametáfosfato sódico. Este producto puede ser dosificado hasta conseguir una concentración máxima del mismo en la corriente de rechazo de 20 mg/l, lo que equivale p.e., a dosificar en el pretratamiento de una desaladora por OI operando con una conversión del 75%, una cantidad de 5 g de producto por m³ de alimentación al sistema de OI:

$$[1 / (1-0,75)] \times 5 = 20$$

El hexametáfosfato sódico se prepara en solución con agua producto de la planta, en el depósito de dosificación, con objeto de facilitar la correcta inyección del mismo por parte de la bomba dosificadora. La efectividad del producto así preparado es de 1 semana, por lo que transcurridos 7 días desde su preparación, si no se ha dosificado la totalidad de la solución, debe desecharse la que quedase y preparar una nueva.

Actualmente, existen a nivel comercial una serie de anti-incrustantes, suficientemente probados y con efectos superiores al anterior. Siempre debe observarse, antes de su empleo definitivo, que el anti-incrustante sea compatible con el tipo de membrana a usar.

A continuación se expone un listado de los productos compatibles con la membrana FT-30 de Filmtec.

En dicha tabla de abril de 1995, están marcados con (*), los tipos EL 5600 y Flocon 100, utilizados en la desaladora cuyos datos se aportan a este trabajo de tesis (apartado 6.3.1 del Capítulo 6 y tabla *T-VII/2* del Capítulo 7).

ANTI-INCRUSTANTE	FABRICANTE	CONCENTRACION MINIMA EN DEPOSITO DOSIFICACION
AF 100	BF Goodrich	
AF 400	BF Goodrich	
AF 600	BF Goodrich	
AF 800 (60 ppm max)	BF Goodrich	0.5 %
AF 1000	BF Goodrich	5 %
ARRO-TREAT 1100	Arrowhead	5 %
ARRO-TREAT 1200	Arrowhead	0.5 %
ARRO-TREAT 1300	Arrowhead	5 %
Betz 602 (15 ppm max)	Betz	0.75 %
Betz 605	Betz	10 %
Betz 606 (36 ppm max)	Betz	10 %
COATEX EM201ASP (20 ppm max)	Coatex	15 %
D8062 (20 ppm max)	Grace Dearborn	50 %
Dearborn 8563	Grace Dearborn	
Dequest 2054	Monsanto	
Drew 11-428 (36 ppm max)	Drew	10 %
Drewperse 770	Drew	10 %
Ecolospere	Ecolochem	10 %
EL 4010	Calgon	
EL 5500	Calgon	
EL 5600 (*)	Calgon	
Flocon 100 (*)	FMC	
Flocon 135	FMC	
Flocon 200 (20 ppm max)	FMC	5 %
Flocon 385	FMC	
Flomate 5405	Grace Dearborn	10 %
Flomate 5406 (36 ppm max)	Grace Dearborn	10 %
Flomate 5407	Grace Dearborn	
HYPER-Sperse	Argo Scientific	
IPC 5986	Chemlink	10 %
Kemazur 2120	Degremont	10 %
N-7295	Nalco	25 %
N-7306	Nalco	25 %
NALCO 2843	Nalco	10 %
Permatreat 471	Houseman	10 %
Permatreat 475 (36 ppm max)	Houseman	10 %
POLYACRYL PT115A (20 ppm max)	Polyacryl	15 %
Pretreat 110 (20 ppm max)	King-Lee	1 %
Pretreat Plus	King-Lee	
Sludgex 692	Maxwell Chemicals	10 %
Sludgex 693 (36 ppm max)	Maxwell Chemicals	10 %
Sodiumhexametaphosphate (SHMP)	-	
SP-2946	Petrolite Ltd.	10 %
SP-2948 (36 ppm max)	Petrolite Ltd.	10 %

TABLA T-III/3: ANTI-INCRUSTANTES COMPATIBLES CON FT-30

3.7.- Restauración del rendimiento. Equipo de limpieza.

Si observamos la evolución con el tiempo de operación de la producción de una planta de desalación por OI, se deduce que este sistema de desalación, como cualquier otro, aún operando en las condiciones adecuadas y con un pretratamiento correcto, fallos en el mejor de los diseños y aún con los más sofisticados sistemas de control, pueden ocurrir accidentes o funcionamientos incorrectos, provocando con ello ensuciamientos en los módulos de OI.

Las medidas a tomar, para la restauración del rendimiento de la planta, son las limpiezas periódicas del sistema de OI. De ahí que el presente apartado de este trabajo de tesis constituya una sección fundamental dentro del diseño y operación de plantas de desalación de aguas salobres por OI. Y como tal así debe figurar en cualquier apropiado manual de mantenimiento de una planta de desalación por el procedimiento de OI.

Partiendo de la base de que los diseños del sistema de OI y de la planta en su conjunto hayan sido correctos. La frecuencia de estas limpiezas depende de varias circunstancias, entre las que se podrían citas como más usuales, las siguientes:

- ✚ Cambios no previstos en las condiciones del agua de alimentación.

- ✚ Pretratamiento incorrecto, causado por averías circunstanciales en componentes del sistema.

- ✚ Operación de la planta fuera de los límites de diseño.

- ✚ Margen de seguridad con el que se haya realizado el diseño, sobre todo por lo que se refiere a los parámetros: presión de alimentación, recuperación y producción (no es conveniente, salvo circunstancias especiales, la operación con valores paramétricos próximos al límite).

3.7.1.- Condiciones para la limpieza.

Como se ha indicado en el apartado anterior, en condiciones normales, a lo largo del tiempo de operación, las membranas de los módulos de OI se irán ensuciando por incrustaciones minerales, materia biológica, partículas coloidales y/o constituyentes orgánicos insolubles.

Estos depósitos sobre la superficie de las membranas van provocando disminuciones de la producción de la planta y en algunas ocasiones, empeoramientos en la calidad del producto.

Los parámetros de control de la planta, indicadores de las condiciones para la limpieza, son: *la producción o flujo de agua producto (F_p)*, *la presión de alimentación (P_a)* y *la presión diferencial alimentación-rechazo (PD_{ar})*.

Debido a que las plantas desaladoras de aguas salobres por OI aquí analizadas, emplean en el sistema de OI, elementos o módulos del tipo PA de arrollamiento en espiral, que permiten un amplio rango de productos químicos combinados con la propia resistencia que las membranas poseen frente a valores críticos de pH y temperatura (apartado. 3.2). Esto nos permite realizar limpiezas mas profundas y más frecuentes que, p.e. en sistemas de OI que utilicen membranas celulósicas.

El criterio seguido para proceder a la limpieza del sistema, basado en datos prácticos que permiten asegurar la efectividad de la misma con el mínimo de gastos, es el de que los módulos de OI deben ser limpiados cuando durante la evolución de la planta, y para las condiciones fijas de operación, con valores paramétricos normalizados, se haya producido un descenso en el flujo de agua producto normalizado (F_{pn}) del orden del 10% del valor inicial, o cuando para mantener fijo el flujo de agua producto, en el resto de las condiciones anteriores, el incremento en la presión de alimentación o en la presión diferencial del sistema hayan sido del mismo orden (10%).

3.7.2.- Agentes químicos a emplear.

Los agentes químicos a emplear serán función del tipo de materia ensuciante.

Los tipos de ensuciamiento normalmente encontrados, así como las soluciones de limpieza más efectivas, teniendo en cuenta tanto resultados, como costes y aplicabilidad práctica, responden a las indicaciones de la tabla adjunta. El disolvente a emplear en todas las soluciones, generalmente es agua producto de la propia planta, a su salida del sistema de OI, esto es antes de la fase de postratamiento, si esta lo posee.

TABLA T-III/4: AGENTES QUIMICOS DE LIMPIEZA

SOLUCION LIMPIEZA PRODUCTO QUIMICO (CONCENTRACION) (VALOR pH)	TIPO DE ENSUCIAMIENTO						
	CaCO ₃	CaSO ₄ BaSO ₄ SrSO ₄ CaF ₂	SiO ₂	OXIDOS E HIDROXIDOS METALICOS	COLOIDES INORGANICOS	MATERIA BIOLOGICA	MATERIA ORGANICA
Ácido Clorhídrico (0,5% V) (2-4)	X	X			X		
Ácido Fosfórico (0,5% V) (2-2,5)	X	X		X			
Ácido Cítrico (2% P) (2,5-4)	X	X		X			
NaOH+Na ₂ EDTA (0,1%+0,1% P) (11-12)			X			X	X
NaOH+SLS (0,1%+0,1% P) (11-12)					X	X	X
Na ₂ CO ₃ (1% P) (10-11)					X		X
FTS+TFS+Na ₂ EDTA (1%+1%+1% P) (-)						X	X

Notas: - P = Porcentaje en peso.
 - V = Porcentaje en volumen.
 - EDTA = Ácido etilen-diamino-tetracético.
 - SLS = Sulfato lauril sódico.

- FTS = Fosfato trisódico.
- TFS = Trifosfato sódico.

A la vista de la mencionada tabla, conviene hacer las siguientes aclaraciones:

A) Incrustaciones de sales inorgánicas.

Las más frecuentes en la región son las debidas al carbonato y sulfato cálcico.

En general, frente a este tipo de ensuciamiento, cualquier ácido puede ser usado, siempre que no ataque a la estructura de la membrana ni produzca precipitados insolubles, de ahí que el ácido sulfúrico no se emplee, ya que durante la limpieza produciría precipitaciones de sulfato cálcico.

Cualquiera de los 3 ácidos propuestos (clorhídrico, fosfórico y cítrico) producen resultados satisfactorios, sin embargo en función del pH de la solución, la limpieza puede ser más o menos efectiva (cuanto más bajo sea el valor de este, mejores son los resultados en todos los casos).

Experiencias prácticas indican el siguiente orden de efectividad:

- . pH entre 2 y 2,5: clorhídrico >> fosfórico > cítrico. Empleándose clorhídrico o fosfórico, en función del grado de ensuciamiento.
- . Para valores de pH superiores a 2,5, la efectividad de los tres es similar, y por razones económicas suele emplearse el cítrico.

B) Incrustaciones de óxidos e hidróxidos metálicos.

Las que con más frecuencia se producen son las debidas al hidróxido férrico. Provocadas normalmente por presencia de hierro en el agua de alimentación, en forma de óxido y/o de hidróxido, y debida esta presencia, por contenerlo el agua bruta a tratar

en el pozo de toma, o por utilización en las líneas de conducción de materiales inadecuados.

En estos casos los ácidos empleados (fosfórico y cítrico) dan buenos resultados. Con pH inferiores a 2,5 mejor el fosfórico que el cítrico.

C) Incrustaciones de sílice.

La precipitación de sílice que no este asociada con hidróxidos metálicos o con materia orgánica es muy difícil de remover por algún medio que no sea físico.

Ciertos resultados ofrece la solución formada por hidróxido sódico y la sal sódica de EDTA (Ver Tabla) en un medio fuertemente alcalino (pH en torno a 12), y con temperatura en torno a los 30°C, con el consiguiente peligro para las membranas.

La solución de limpieza que mejores resultados ha ofrecido, es la de bifluoruro amónico al 2,4% en peso, combinado con cítrico en el mismo porcentaje, con temperatura de 30°C y pH de 1,5. Siendo en este caso el riesgo para las membranas aún mayor, aparte del peligro que conlleva el manejo del bifluoruro, por lo que es desaconsejable en la práctica su uso, salvo casos puntuales.

La consecuencia inmediata es que el mejor y prácticamente único "*método de limpieza*", en los casos de incrustaciones de sílice, es "*prevenirlas*", operando con recuperaciones en la planta que no den lugar a saturaciones de esta en el concentrado, y/o utilizar el anti-incrustante específico y adecuado, según se ha indicado en anteriores apartados.

D) Ensuciamiento provocado por coloides inorgánicos.

Producido al tratar aguas con alto índice de ensuciamiento o atascamiento (SDI), cuyo contenido en materia en suspensión ha sido inadecuadamente tratado en el sistema de pretratamiento o por fallos en el mismo, que han provocado su paso al sistema de OI,

causando ensuciamiento o atascamiento de los módulos.

La solución de limpieza formada por carbonato sódico al 1% en peso y pH natural en torno a 10,5 se ha mostrado bastante eficaz, ofreciendo similares resultados a los producidos por otras soluciones detergentes de costo más elevado.

E) Ensuciamiento por materia orgánica o precipitación de compuestos orgánicos.

Suelen ser bastante efectivas todas las soluciones que se indican en la tabla, sin embargo las soluciones detergentes con valores de pH entre 11 y 12 ofrecen los mejores resultados, debiéndose tener la precaución de uso de aquellos que sean compatibles con el tipo de membrana empleado. En los casos de que estos ciclos de limpieza sean muy frecuentes o exista peligro por el elevado valor de pH para la membrana, experiencias prácticas indican buenos resultados también con pH inferiores, llevando la temperatura de la solución de limpieza a valores de 35-40°C.

F) Ensuciamiento microbiológico.

En estos casos la mejor limpieza se consigue empleando en la solución agentes desinfectantes, sin embargo el más útil agente, el cloro, resulta inadecuado para las membranas tipo PA.

Por lo que para estos tipos de ensuciamiento se han de considerar los posibles efectos que sobre la membrana empleada, produzcan estos agentes. Y como en el caso anterior, otro factor importante a considerar será la frecuencia con que deba realizarse este tipo de limpieza. Si la frecuencia es escasa y las membranas lo permiten, una solución bastante efectiva es la ya mencionada para las incrustaciones de sílice, pero con mejores resultados que frente a aquella. Esto es sal sódica de EDTA e hidróxido sódico, pH de 12 y 30°C de temperatura.

Para otros casos, en la tabla se indican otras soluciones de limpieza a emplear con resultados bastante aceptables, sobre todo cuando el grado de ensuciamiento no es muy

elevado. Siendo recomendable en plantas donde se prevea este tipo de ensuciamiento con cierta frecuencia, emplear una adicional solución desinfectante, a base de una solución de formaldehído (formol) al 0,5-1% en peso, como desinfección final de los módulos de OI y para retardar los crecimientos biológicos. Incluso en muchos casos son convenientes tratamientos de choque, durante los periodos de operación normal de la planta, con bisulfito sódico en cantidades que oscilan entre 500 y 1000 mg/l de Na_2SO_3 , dosificadas en continuo durante unos 30 minutos.

3.7.3.- Equipo de limpieza química.

Todas las plantas de desalación de aguas salobres por OI, deben ser diseñadas previendo en el conjunto que constituye el sistema de OI, y como un equipo asociado al mismo, el equipo de limpieza química.

Normalmente, este equipo constituye una unidad aparte, independiente del resto de los equipos que constituyen la planta, y como tal aquí se va a tratar.

- PRECAUCIONES DE SEGURIDAD.

Una vez conocidos los apartados anteriores, se hace necesario el observar las siguientes precauciones de seguridad:

1) Los productos químicos listados en la tabla anterior, son de uso industrial, y su manejo y utilización exigen unos conocimientos de seguridad que deben ser consultados previamente a sus propios fabricantes.

2) En la preparación de las soluciones de limpieza debe asegurarse que todos los productos que la componen están disueltos y bien mezclados antes de su introducción en los módulos de OI.

3) En todos los casos la temperatura de la solución de limpieza no debe ser inferior a 20°C.

4) Aún cuando todas las soluciones de limpieza, indicadas en la tabla, pueden ser usadas con cualquier módulo de OI del tipo PA de arrollamiento en espiral. En orden a evitar cualquier grado de hidrólisis en la membrana empleada o cualquier daño en esta o en cualquier otro componente del módulo, durante la recirculación de las distintas soluciones, las temperaturas máximas de estas serán función del pH de las mismas, y tanto estas como los valores de aquellos, deben ajustarse a las especificaciones del fabricante de los elementos de OI. Motivo por el cual unos fabricantes recomiendan unos tipos de soluciones y otras.

5) Cuando para la limpieza química sea preciso el uso de varias soluciones de limpieza. Se utilizarán independientemente y la secuencia de utilización de estas irá en consonancia con los valores del pH de cada una de ellas, de modo que la primera solución a utilizar será aquella cuyo medio sea más ácido (valor de pH mínimo), y la última será la más alcalina (valor de pH máximo). En estos casos, antes y después de cada una de las limpiezas, los módulos de OI deben ser enjuagados durante el suficiente tiempo y con el adecuado caudal de agua de buena calidad exenta de cloro a temperatura no inferior a 20°C (es recomendable el uso de agua producto de la planta para este menester).

6) Ya que debe disponerse de la suficiente cantidad de agua producto para realizar el ciclo de limpieza, y normalmente no se dispone de tal volumen a priori. Frecuentemente se hace necesario "producirla" entre limpieza y limpieza, en cuyo caso se debe cuidar que una vez enjuagados los módulos después de la última limpieza:

6.1) Colocar los dispositivos de arranque de la planta en posición de puesta en marcha. Poner en marcha solo la bomba de transferencia de agua bruta haciendo pasar, con la válvula de control de flujos totalmente abierta, un reducido caudal de agua de alimentación a una presión inferior a 4 kg/cm², durante 10 minutos con la finalidad de purgar el sistema, estabilizar el pH sobre la superficie de las membranas y permitir la recuperación gradual de las mismas.

6.2) Poner en marcha la planta con bajas presión de alimentación,

producción y recuperación, descargando el producto a drenaje al menos por 10-15 minutos, hasta que se observe una estabilidad en los flujos de producto y rechazo. Con el fin de no presurizar el sistema de OI con restos de precipitados de la última limpieza. A medida que la conductividad del producto vaya decreciendo, aumentar presión, producción y recuperación, hasta llevar los valores anteriores, gradualmente, a los nominales de operación. Puesta la planta en operación, se procede a la toma de agua producto para la siguiente limpieza.

- EQUIPO DE LIMPIEZA.

El equipo de limpieza química responde, en general, al diagrama mostrado (Figura F-III/33). Los materiales de construcción deben ser compatibles químicamente con todas las soluciones de limpieza y resistentes a la corrosión.

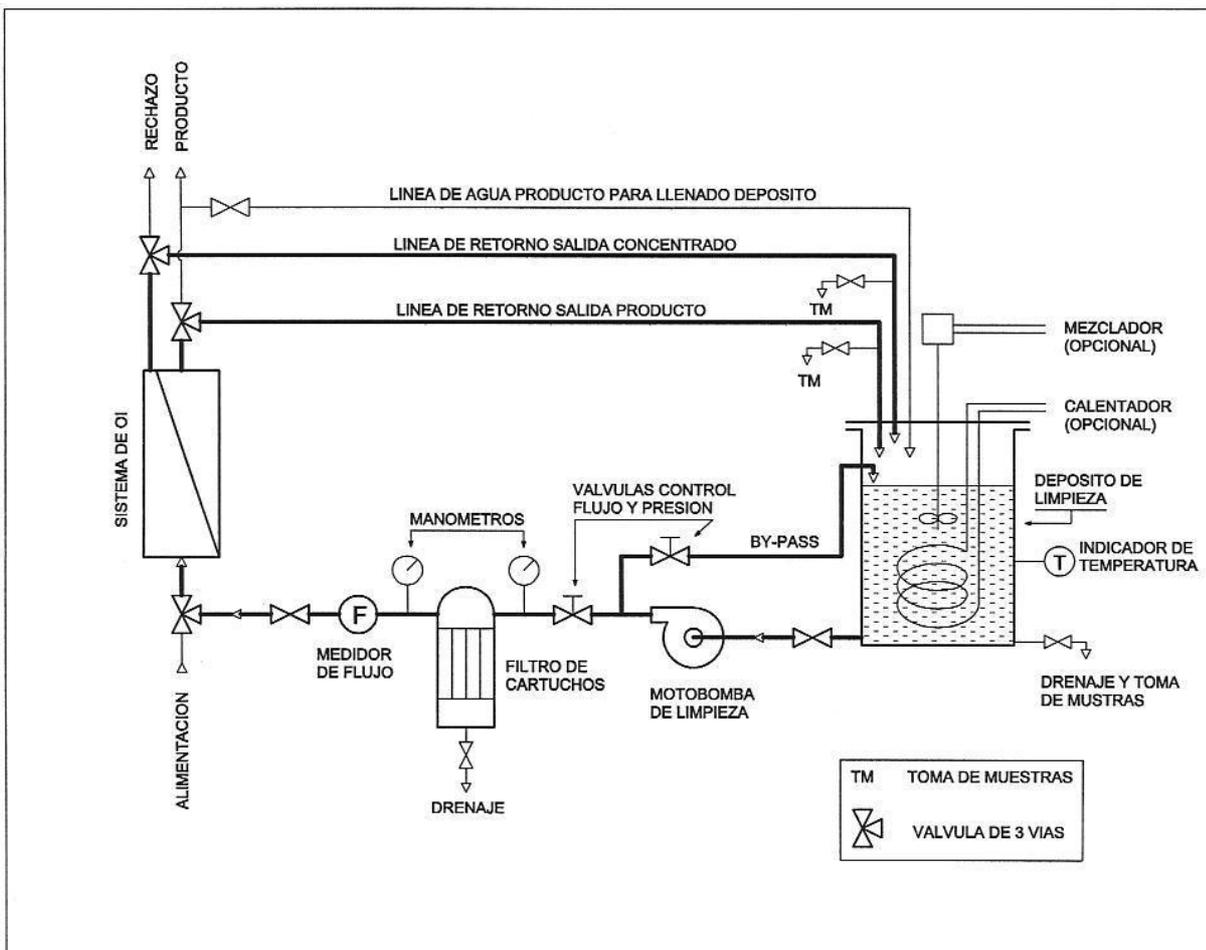


FIGURA F-III/33: EQUIPO DE LIMPIEZA

Se compone fundamentalmente de un depósito, una bomba de circulación a baja presión, un filtro de cartuchos y una serie de válvulas y medidores de presión, caudal y temperatura, para control y regulación, dispuestos en un circuito constituido por 3 líneas de conducción independientes, para acoplar respectivamente a los conductos de alimentación, producto y rechazo del conjunto de módulos de OI a ser limpiado.

A) Depósito de limpieza.

Fabricado en polipropileno o material plástico (poliéster) reforzado con fibra de vidrio, el depósito debe disponer de indicador de temperatura, calentador cuando se prevean temperaturas en el agua inferiores a 20°C o tipos de ensuciamiento que requieran soluciones de limpieza a temperaturas superiores. El mezclador no es generalmente necesario, ya que como tal puede actuar la propia bomba de limpieza, mediante dispositivo en by-pass.

El depósito debe ser dimensionado para un tiempo de retención mínimo de 3 minutos, a caudal máximo de limpieza, teniendo en cuenta que el volumen mínimo de la solución (V_c), debe ser capaz de cargar completamente, todo el conjunto modular y líneas de conducción, con la solución de limpieza.

Así, si se desean limpiar de una vez un máximo de N_{pv} contenedores (PV), cada uno de los cuales alberga N_{moi} módulos de OI de D_{moi} de diámetro nominal (en pulgadas) y L_{moi} de longitud total individual (en pulgadas). Siendo L_l m. la longitud total y D_l mm el diámetro de las líneas de conducción, para alimentación de la solución de limpieza y retornos de producto y rechazo al depósito. El volumen total de carga será:

$$V_c = V_{pv} + V_l \text{ litros.} \quad (Ec.50/3)$$

siendo,

$$V_{pv} = N_{pv} \times N_{moi} \times L_{moi} \times 25,4 \times \pi \times (D_{moi} \times 25,4 / 2000)^2 \quad (Ec.51/3)$$

$$V_{pv} = N_{pv} \times N_{moi} \times L_{moi} \times (D_{moi})^2 \times 0,0129 \text{ l.}$$

$$V_l = L_l \times \pi \times (D_l / 2000)^2 \times 10^3 = L_l \times (D_l)^2 \times 7,85 \times 10^{-4} \text{ l.} \quad (\text{Ec.52/3})$$

Por otra parte, si $Q_l \text{ m}^3/\text{h}$ es el caudal máximo de limpieza. El depósito de limpieza habría de tener una capacidad de:

$$V_{dp} = V_c + (Q_l \times 10^3 \times 3 / 60) = V_c + (Q_l \times 50) \text{ l.} \quad (\text{Ec.53/3})$$

Así p.e., si aplicamos estos cálculos, a nuestro caso práctico (Capítulo 6), en el que:

$$N_{pv} = 5; N_{moi} = 4; L_{moi} = 40; D_{moi} = 8; L_l = 23; D_l = 63$$

$$\text{Siendo } Q_l = 18,2 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Obtenemos aplicando las ecuaciones (Ec.50/3), (Ec.51/3), (Ec.52/3) y (Ec.53/3):

$$V_{pv} = 5 \times 4 \times 40 \times (8)^2 \times 0,0129 = 661 \text{ l.}$$

$$V_l = 23 \times (63)^2 \times 7,85 \times (10)^{-4} = 72 \text{ l.}$$

$$V_c = 733 \text{ l.}$$

$$V_{dp} = 733 + (18,2 \times 50) = 1.643 \text{ l.}$$

Se empleó una capacidad total de $2 \times 900 = 1.800 \text{ l.}$

B) Bomba de limpieza.

Diseñada para operar con el fluido de limpieza, a los valores máximos previstos de caudal y presión (teniendo en cuenta la caída de presión que se produzca posteriormente

en el filtro). Sus materiales de construcción deben ser compatibles con los agentes químicos a emplear en las soluciones de limpieza, empleándose normalmente acero inoxidable AISI-316 o materiales plásticos. El tipo de bomba más recomendable es la centrífuga, dada su seguridad y alta flexibilidad para operar a distintos caudales y presiones.

Para regular la presión y flujo de circulación, en la descarga de la bomba se dispone una válvula de control de tipo mariposa o similar, de diámetro y material plástico adecuado. De material similar y del tipo compuerta o bola se dispondrá otra en la línea de recirculación o by-pas al depósito.

C) Filtro de cartuchos.

Para protección de los módulos de OI, durante el ciclo de limpieza, de la presencia en la solución de sólidos no disueltos. En la línea de alimentación y a continuación de la bomba se dispondrá de un filtro de cartuchos, equipado con cartuchos de polipropileno y grado de filtración de 5 micras, dimensionado con el suficiente número de estos, para que la superficie filtrante total sea adecuada al caudal máximo de circulación.

Los materiales recomendados para el resto de componentes del filtro son inoxidable AISI-316, PVC o material plástico reforzado con fibra de vidrio.

D) Circuito de limpieza y componentes.

El circuito cerrado de limpieza, con salida y entradas al depósito, debe diseñarse de modo que la dirección de flujo de la solución en el sistema de OI sea el mismo que corresponde a la operación normal de este. Esto es, la línea de alimentación de limpieza se acoplará a la línea o conexión de alimentación del contenedor o contenedores a limpiar, acoplándose las líneas de reciclado al depósito de limpieza, a las respectivas conexiones de producto y rechazo. Por lo que en el diseño de la planta han de estar previstas las correspondientes derivaciones y válvulas para tal fin.

Para el control del caudal de limpieza se dispondrá de al menos un medidor de flujo en la línea de alimentación.

El dimensionado del circuito, deberá realizarse de modo que las caídas de presión en las líneas sean mínimas, en cualquier caso la velocidad de circulación del fluido de limpieza en ellas estará en función del material y de su diámetro, y en cualquier caso no será inferior a 0,6 ni superior a 3 m/sg. En cuanto a los materiales empleados, normalmente suelen ser PVC o PE rígido o flexible.

- PARAMETROS DE LIMPIEZA.

Determinado el volumen de la solución de limpieza, como ya se ha indicado. El pH y la temperatura de la misma, están en función del tipo de solución a emplear, y del tipo de elementos o módulos utilizados en el sistema de OI.

El caudal de limpieza (Q_l), es función del número (N_{pv}) y diámetro nominal (D_{pv}) de los contenedores (PV, Pressure Vessel) a limpiar simultáneamente. Estando sus diámetros normalizados, los valores máximos recomendados del caudal de limpieza por unidad de contenedor (PV) son los siguientes (indicando D_{pv} en pulgadas y $Q_{lm\acute{a}x}$ en $m^3/h/PV$):

D_{pv}	$Q_{lm\acute{a}x}$
2,5	0,7
4	2,3
6	4,6
8	9,1
11	18,2

Para la determinación de Q_l , resta pues indicar el número de contenedores (PV) susceptibles de ser limpiados simultáneamente.

Como se ha visto en el apartado 3.2 de este Capítulo, los tubos de presión (PV) en una planta de desalación, pueden estar distribuidos según un sistema de OI de arreglo simple serie o paralelo (un solo banco), o según un sistema de arreglo múltiple o mixto (varios bancos). En los casos de un solo banco con disposición en paralelo, el sistema dispone de sus N_{pv} colocados en paralelo, y podrán limpiarse al mismo tiempo, por lo que el caudal máximo de limpieza a prever en m^3/h será $N_{pv} \times Q_{lm\acute{a}x}(m^3/h/PV)$.

En los casos de varios bancos (disposición mixta), si el arreglo es del tipo 3:2 (3 PV en paralelo en la 1ª etapa, en serie con 2 PV en paralelo en la 2ª etapa), también el número de contenedores susceptibles de ser limpiados simultáneamente, será el número total de PV del sistema, siendo en este caso el caudal máximo en m^3/h de $(2 \times N_{pv}/5) \times Q_{lm\acute{a}x}(m^3/h/PV)$.

Sin embargo en los casos de arreglos del tipo 2:1 (el nº de PV de la 1ª etapa es el doble del nº de PV de la 2ª), debido a que el caudal máximo para el segundo banco resulta demasiado bajo en el primero, ambos bancos deben ser limpiados separadamente, siendo en este caso el primer banco el que aporta el caudal máximo de limpieza, a efectos de diseño del equipo.

En cuanto a la presión máxima recomendada, es la mínima necesaria para compensar la caída de presión desde la alimentación al rechazo del conjunto de contenedores limpiados simultáneamente, producida con el caudal de limpieza. Por lo que dependerá de la disposición de estos contenedores, del número de módulos en serie por contenedor, y de su tipo y nivel de ensuciamiento.

En cualquier caso el valor máximo permitido debe ser inferior a $4,2 \text{ kg/cm}^2$, ya que debe evitarse que ningún módulo de $L_{moi} = 40''$, pueda estar sometido a una presión diferencial superior a $1,4 \text{ kg/cm}^2$, al objeto de minimizar la redeposición de suciedad sobre la superficie de las membranas, durante la propia limpieza y sobretodo en el comienzo de

esta hasta que la dilución se haya producido tras un cierto tiempo de reciclaje al depósito de limpieza.

- PROCEDIMIENTOS DE LIMPIEZA.

La experiencia práctica en la región, con este tipo de instalaciones, ha mostrado que generalmente a la hora de efectuar la limpieza química de los módulos de OI, se ha hecho necesario efectuar, como mínimo 2 tipos de limpieza, una con solución de limpieza en medio ácido (1) y otra en medio alcalino (2).

En estos casos, como ya se ha indicado, debe efectuarse en primer lugar la limpieza (1). Los procedimientos de limpieza, tanto en un caso como en otro, comprenden las siguientes etapas sucesivas:

1) Estando la planta en operación se llena el depósito de limpieza con agua producto de la planta.

Se para la planta, se colocan en posición de apertura total las válvulas de control de presión y flujos, y una vez estabilizado el proceso de osmosis, es decir cuando haya cesado el flujo inverso de agua producto, desde el depósito de producto hacia los módulos de OI, se hace circular agua bruta filtrada durante 5-10 minutos, solo con la bomba de transferencia en marcha, sin dosificación alguna de productos en el sistema de pretratamiento, y con una presión de entrada al sistema de OI lo más reducida posible, al objeto de facilitar la evacuación por el conducto de rechazo de los precipitados de alta concentración que se mantienen en solución sobre la superficie de las membranas.

2) Se conectan las líneas del circuito de limpieza a las correspondientes derivaciones de la alimentación, producto y rechazo del sistema de OI, o parte del mismo que vaya a ser limpiado de una vez, aislándose a este del resto de la planta mediante las correspondientes válvulas. Las líneas del circuito de limpieza previstas para la recirculación del producto y rechazo al depósito de limpieza química, se aíslan de este mediante las correspondientes válvulas y se conectan ambas al drenaje de la instalación.

3) Se prepara la solución de limpieza en el correspondiente depósito. Se cierra totalmente la válvula de control de presión de limpieza y se pone en posición de apertura total la válvula de by-pas. Se pone en marcha la bomba de limpieza, recirculando la solución hacia el depósito durante unos 10 minutos, para facilitar la completa mezcla de los productos en la solución. A continuación se pone la solución en las condiciones de pH y temperatura previstas.

4) Sin parar la bomba de limpieza, se regulan las válvulas anteriores, para proceder a la carga de los módulos de OI y desplazar de ellos el agua contenida hacia el drenaje de la instalación. El proceso de carga de los módulos con la solución de limpieza se realiza con la mínima presión necesaria y en condiciones de bajo flujo (aproximadamente la mitad del caudal máximo). Desplazado el volumen de carga de los módulos del depósito de limpieza, se para la bomba de limpieza, se cierran las válvulas de drenaje y se abren las de recirculación al depósito del producto y concentrado.

5) Se pone en marcha de nuevo la bomba de limpieza, recirculando la solución a través de los módulos de OI hacia el depósito de limpieza durante unos 45 minutos, a lo largo de los cuales y de manera secuencial, cada 15 minutos se irá actuando sobre las válvulas de control de flujo y presión, para ir aumentando escalonadamente la presión y caudal de limpieza, de forma que durante los últimos 15 minutos el caudal de limpieza sea el máximo previsto, y la presión a ser posible sea la máxima recomendada, pero que en ningún caso supere el valor máximo permitido. En cada secuencia de control del caudal y presión, se comprobarán así mismo los valores de la temperatura y pH de la solución, para mantenerlos en los valores prefijados.

6) Transcurridos los 45 minutos de circulación de la solución de limpieza. Se para la bomba, se abren las válvulas de drenaje y se cierran las de recirculación al depósito del concentrado y producto. Se pone en marcha de nuevo la bomba para desplazar toda la solución del depósito hacia el drenaje.

7) Si se dispone de la suficiente cantidad de agua producto en el depósito de producto. Se vuelve a llenar el depósito de limpieza, y se hace circular agua producto a

través de los módulos de OI y hacia el depósito de limpieza, en las mismas condiciones de presión y caudal anteriores, durante unos 10 minutos para enjuague de los mismos y posterior vertido a drenaje. En caso de no disponer de la suficiente agua producto, el enjuague anterior puede ser realizado con agua bruta filtrada. Tanto en un caso como en otro la temperatura del agua habrá de ser superior a 20°C.

8) Transcurrido el ciclo de limpieza y posterior enjuague, la puesta de nuevo en operación de la planta se realizará de acuerdo a los apartados anteriores.

A veces, sobretodo si el grado de ensuciamiento ha sido alto, se ha comprobado que realizar entre las etapas 4 y 5, un tiempo de retención de la solución de limpieza en los módulos de OI, por 1-10 horas, en función del nivel de ensuciamiento, el tipo de solución de limpieza y tipo de módulos empleados en la planta, manteniendo una temperatura de la misma superior a los 20°C. Ha aumentado la eficacia de la limpieza.

3.7.4.- Limpieza osmótica.

Existen dos razones fundamentales para aconsejar que en el diseño de cualquier planta de desalación por OI, se prevea la instalación dentro del sistema de OI y como otro equipo asociado al mismo, de un depósito para el agua producto, situado a continuación del sistema de OI, antes del postratamiento, con entrada del agua producto directamente desde los contenedores de módulos de OI, por la parte inferior del mismo, cuya cota debe ser superior al contenedor situado a mayor altura. Y que una vez lleno, permita la salida libre de agua producto por su parte superior, para que a partir de ahí y por gravedad, circule el fluido hacia la fase de postratamiento o destino final. En el diseño debe preverse, así mismo un volumen mínimo para dicho depósito, en función del tipo y número de módulos de OI de que disponga el sistema, y en función también del contenido en sales del agua de alimentación. En la práctica, fijado el tipo y número de módulos, se toma una capacidad del depósito (V_{dp}) como mínimo igual al volumen de carga del conjunto de contenedores modulares del sistema de OI de la planta (obtenido según el apartado anterior).

Veamos a continuación las razones que aconsejan este diseño:

1ª) En una planta de desalación por OI en operación, debido al efecto de la presión, las membranas de los módulos de OI, están dilatadas de forma que en torno a un 60% de su volumen está constituido por agua.

Al efectuarse una parada de la planta, al ser nula la presión de alimentación, debido al fenómeno de la osmosis natural, se produce una difusión de agua desde el lado de la membrana correspondiente al agua producto (solución más diluida), hacia el lado del concentrado (solución más concentrada), hasta que el equilibrio entre ambas concentraciones se alcance.

Si por el lado del agua producto, no se dispone de la suficiente cantidad de agua, la membrana terminará succionando aire, el cual secará las fibras de la misma, produciendo un encogimiento de estas. Este encogimiento, incluso puede ser irreversible si el periodo de parada es largo (varios días), aún tomando las oportunas medidas de seguridad.

2ª) Existe un método de limpieza, del cual no se ha hecho referencia en los apartados anteriores, denominado procedimiento de *limpieza "osmótica"*, que si bien no ofrece los resultados de los anteriores, si que se ha comprobado que sus resultados ayudan a alargar bastante los ciclos de limpieza tradicionales.

Este método consiste en disponer de una suficiente reserva de agua producto, a la salida inmediata del sistema de OI, sin postratamiento alguno, y en condiciones de bajo contenido en sales totales disueltas. Teniendo todos los conductos de los PV completamente llenos de esta agua y con dicho deposito incorporado a ellos, de forma que su contenido pueda ser absorbido (succionado) por estos. Se prepara una solución de cloruro sódico, que dependiendo del volumen de producto a disponer, puede ser del orden del 3 al 10% (30-100 g/l), dicha solución se introduce en el sistema de OI por la conexión de alimentación del mismo, para lo cual puede emplearse el propio equipo de limpieza de la planta. Al ser función el flujo inverso de agua producto, de la presión

osmótica neta solución-producto, un considerable caudal de agua producto se introduce hacia el lado de la alimentación de cada una de las membranas de los módulos.

Este contraflujo (flujo inverso) levantará total o parcialmente aquellos depósitos que no estén fuertemente incrustados en la superficie de las membranas, facilitando con ello, que estos puedan ser liberados y rechazados con un posterior enjuague de los módulos.

3.7.5.- Periodos de parada. Protecciones.

Ya se ha indicado que, si los módulos de OI están biológicamente ensuciados, es conveniente una desinfección final de los mismos, a base de una solución de formaldehído al 0,5-1%.

Si se prevén paradas de la planta superiores a 24 horas, sin estar los módulos con ningún tipo de ensuciamiento, deben tomarse medidas para la esterilización y protección biológica de los elementos de OI, esto es para prevenir el crecimiento biológico durante la etapa de parada y preservar los módulos de OI, para que no sufran ningún tipo de degradación en sus características de productividad y rechazo de sales.

Si el periodo de parada previsto es inferior a una semana, se consigue la protección adecuada, mediante una solución de bisulfito sódico al 1% en peso.

Para periodos más largos, la mejor protección se consigue mediante el uso de una solución de bisulfito sódico (1% en peso) y glicerina (20% en peso).

Como equipo de esterilización puede emplearse el mismo equipo de limpieza de la planta, como volumen de la solución el mismo de las soluciones de limpieza y como procedimiento el mismo seguido desde la etapa 1 a la 5, en el apartado 3.7.3 (Subapartado de "Procedimientos de Limpieza"), reciclando solo el rechazo y enviando el producto a drenaje, considerando solo los primeros 15 minutos de recirculación,

transcurridos los cuales se para esta, dejando la solución en el interior de los contenedores modulares.

Si la parada del sistema es de varios meses, es conveniente cada mes renovar la solución.

Transcurrido el tiempo de parada, debe procederse al vaciado de la solución y posterior enjuague del sistema, antes de su puesta en operación, según las etapas 7 y 8 del mencionado apartado.

3.7.6.- Regeneración de membranas.

Este es un procedimiento que se aplica cuando se ha producido, a lo largo del tiempo de operación de una planta, una pérdida irreversible en las características de rechazo de sales del sistema de OI, como propósito de recuperar parte de las mismas e intentar alargar al máximo la vida útil de los módulos.

El procedimiento requiere que la estructura de las membranas este prácticamente intacta, y comprende en general 2 tipos de tratamientos, uno para la superficie de las membranas y otro para "cerramiento" de los poros de las mismas, por lo que una de sus primeras consecuencias "postratamiento", es el aumento de la presión útil de operación del sistema de OI y por tanto una disminución en la productividad de este.

Debido a las características de las propias membranas, y a los costos que este proceso genera, los resultados además de no ser permanentes, son de escasa eficacia. El procedimiento en la actualidad esta fundamentalmente aplicado a casos concretos de desalación de aguas salobres, cuando las membranas empleadas son del tipo AC y en otros tipos de membranas para desalación de agua de mar donde se requiere el mantenimiento de un alto rechazo de sales en condiciones severas de operación. Por lo que no se ha considerado un análisis con más profundidad.

3.8.- Puesta en operación de plantas de OI.

3.8.1.- Instalación.

Para la fabricación e instalación de plantas de desalación por OI, se hace necesario el disponer previamente de una descripción completa de las mismas, lo cual incluye:

- a) Diagrama de flujos general de la planta.
- b) Lista de equipos, instrumentación y materiales.
- c) Naturaleza y procedencia del agua bruta a tratar.
- d) Configuración de los sistemas componentes: sistema de pretratamiento, sistema de tratamiento y sistema de postratamiento.

El conocimiento de los 4 apartados anteriores estará incluido en el correspondiente diagrama de tuberías e instrumentación (P & I) de la planta.

Una primera lista de comprobación y ensayos, deberá confeccionarse a la vista de este diagrama, comprendiendo los siguientes apartados:

A) Sistema de pretratamiento:

- Los materiales usados para tuberías y equipos deberán ser resistentes a la corrosión, compatibles con la presión y el pH de operación, debiendo disponer de protección contra la corrosión galvánica.

- Asegurarse que la situación del filtro(s) de cartuchos es la correcta, en la línea de aspiración de la bomba de alta presión y que tanto el número de cartuchos, como su

material (polipropileno) y grado de filtración (5-10 micras), son los adecuados.

- Comprobar que se ha previsto para la línea de contralavado del filtro(s) multicapa o de arena, la correspondiente conducción a drenaje.

- Se comprobará que todos los equipos y elementos asociados al sistema de pretratamiento, bombas de transferencia de agua bruta, manómetros, válvulas, presostatos, tuberías, etc., son los previstos para la presión y pH de operación, resistentes a la corrosión y están adecuadamente instalados y conexionados.

- Si la etapa de pretratamiento comprende dosificación de productos químicos, tales como anti-incrustantes y/o ácido, deberá comprobarse que:

* Los puntos de inyección en la línea, se encuentran situados antes del filtro(s) de cartuchos.

* Comprobar que la línea de alimentación dispone de los elementos adecuados para lograr la apropiada mezcla de los aditivos, y que estos, como es el caso de los mezcladores estáticos provocan un mínimo de pérdida de carga.

* Las válvulas de retención de las líneas de aspiración e inyección, de las unidades dosificadoras, deben estar adecuadamente instaladas, prestando especial cuidado a su orientación con el fin de que la dirección del flujo en las mismas sea el correcto.

* Asegurarse que el equipo eléctrico de la planta dispone de los elementos necesarios para imposibilitar la operación del sistema de OI en caso de parada de alguna bomba dosificadora y viceversa.

* En los casos de dosificación o presencia de cloro en el agua de alimentación, y si el sistema de OI va a disponer de elementos de poliamida (PA), habrá de comprobarse que se han tomado todas las previsiones necesarias para asegurar

que el agua de alimentación a su entrada al sistema de OI, este completamente exenta de cloro.

B) Sistema de tratamiento:

- En la zona del P & I de la planta, donde se muestre el diagrama esquemático del arreglo y componentes del sistema de OI, se indicará el número de serie de cada módulo de OI y la posición en la que cada uno irá situado a la hora de su colocación en el conjunto de contenedores de módulos (PV).

- Se comprobará que cada PV, así como el conjunto de ellos que constituyen el sistema de OI, dispone de las conexiones y tuberías adecuadas para las líneas de alimentación, producto y rechazo y que han sido previstas las correspondientes derivaciones para limpieza y toma de muestras.

- Se comprobará que todos los equipos y elementos asociados al sistema de tratamiento, bomba de alta presión, medidores de flujo, manómetros, válvulas de control, presostatos, tuberías, etc., son los previstos para la presión y pH de operación, resistentes a la corrosión y están adecuadamente instalados y conexiónados.

3.8.2.- Puesta en marcha.

Una vez la planta instalada, y antes de su puesta en marcha, deberán observarse las siguientes precauciones:

1^a) Los módulos o elementos de OI constituyen el último equipo a instalar, ya que a efectos de prevenir el crecimiento biológico en su interior y evitar cualquier tipo de degradación, se envían, normalmente, conteniendo una solución de glicerina y bisulfito sódico, o de formol, o envasados al vacío. En el primer caso, la solución deberá ser descargada por el rechazo, mediante un lavado a baja presión con el agua de alimentación, inmediatamente antes de proceder a la puesta en marcha de la planta.

2ª) Comprobar la correcta instalación de todos los equipos asociados a cada uno de los sistemas, y que dependiendo de cada planta en particular, se dispone así mismo de los equipos y materiales auxiliares necesarios. Al objeto de controlar la puesta en marcha, debe disponerse como mínimo del siguiente equipo auxiliar portátil, con independencia del instalado en la planta:

* Un medidor del SDI.

* Un medidor de temperatura.

* Un medidor de pH.

* Un medidor de conductividad.

* Un medidor de cloro libre, en los casos en los que se prevea presencia del mismo.

3ª) Lavar y purgar todas las líneas de conducción de fluidos de la planta. Asegurándose previamente que todas las motobombas de la planta están listas para la operación, comprobándose su lubricación, sentido de rotación, tensión, etc.

4ª) Calibrar toda la instrumentación, manómetros, medidores de conductividad, pH y de flujo, presostatos, puntos de alarma, etc.

5ª) Antes de la instalación de los módulos de OI, proceder a una prueba a baja presión, a efectos de regulaciones, corrección de posibles fugas, etc.

6ª) Descargado el sistema de OI, se procederá a la colocación de los módulos en sus correspondientes PV, de acuerdo al número de serie y orden establecidos anteriormente, prestándose especial cuidado con las conexiones entre módulos.

7ª) Antes de proceder a la puesta en marcha, se realizará la purga de aire

definitiva de toda la planta, solo con la bomba de transferencia de agua bruta en marcha, a una presión de alimentación no superior a 4 kg/cm^2 , habiéndose comprobado previamente que todas las líneas de conducción de agua producto están abiertas, así como la válvula de control de flujos.

8ª) Una vez realizada la purga en las condiciones anteriores, se procede a la puesta en marcha la planta, actuándose en la válvula de control de presión (bomba alta presión), de modo que al menos durante 1 hora de operación continua, la presión de alimentación no supere los 10 kg/cm^2 , continuando con aumentos progresivos de $1\text{-}2 \text{ kg/cm}^2$ cada 10-15 minutos, mientras se comprueba el correcto funcionamiento de todos los equipos, y hasta que, actuando en ambas válvulas de control (presión y flujos), se lleve a operar la planta en las condiciones pre-establecidas de diseño, conduciéndose a drenaje el agua producto durante estas primeras horas de operación.

9ª) Una vez la planta haya estado operando, en las condiciones de diseño, por 1-2 horas, se anotan los parámetros reales de operación y se dejan transcurrir al menos 24 horas de operación continua, para proceder a realizar una toma de muestras de las corrientes de alimentación, producto y rechazo, para posterior análisis.

3.8.3.- Parámetros fundamentales de control.

La manera de conocer la evolución del rendimiento de una planta, a partir de su puesta en operación, es a través de los datos de operación que esta aporta, y que por tanto deben ser anotados periódicamente. Estos datos deben incluir, al menos, una serie de parámetros fundamentales de control, cuya frecuencia de anotación dependerá de un conjunto de condicionantes, como son la propia evolución de la planta, tamaño y grado de automatización, tipo de sistema de pretratamiento empleado, naturaleza y condiciones del agua bruta a tratar, destino del agua producto, etc. Es decir, cada planta en concreto será la que indique en la práctica esta periodicidad.

No obstante, tomando como base criterios prácticos generales para la frecuencia

de anotación, podemos clasificar estos parámetros de control en dos grupos que se indican en los apartados siguientes. Con la aclaración de que su clasificación en uno u otro grupo no supone mayor o menor importancia.

Parámetros de toma diaria.

- * Fecha de toma de datos.
- * Hora de toma de datos.
- * Horas de operación (t).
- * Temperatura del agua (T).
- * Presiones diferenciales en filtros (PD_f).
- * Presiones de alimentación y producto (P_a y P_p).
- * Presión diferencial alimentación-rechazo (PD_{ar}).
- * Conductividades de alimentación y producto (CDV_a y CDV_p).
- * pH de alimentación, producto y rechazo (pH_a , pH_p y pH_r).
- * Producción o flujo de agua producto (F_p).
- * Rechazo o flujo de agua de rechazo (F_r).
- * Regulación bombas dosificadoras.
- * Niveles productos químicos en depósitos de dosificación.

- * Incidentes anormales (paradas, fallos, limpiezas, etc.).

Parámetros de toma semanal o mensual.

- * Consumo general de energía eléctrica de la planta.
- * Energía o intensidad absorbida por cada motobomba.
- * Conductividad del producto de cada PV del sistema (CDV_{pi}).
- * Índice de atascamiento del agua de alimentación (SDI).
- * Toma de muestras de alimentación, producto y rechazo, con análisis químico de estas.

3.8.4.- Datos de mantenimiento.

Las anotaciones que sobre el mantenimiento de la planta se realicen, aportarán una mayor información y conocimiento acerca del rendimiento de la misma en general, y en particular de los módulos de OI y del resto de los equipos. Por lo que resultará conveniente disponer de los siguientes datos:

- * Fallos mecánicos, reemplazamientos de componentes, etc.
- * Reemplazamientos de módulos de OI (número de serie y posición).
- * Ciclos de limpiezas químicas (procedimientos, productos empleados, concentraciones, etc.).
- * Posibles cambios de productos químicos en las etapas de pre y/o postratamiento (tipos y nuevas condiciones de uso).

- * Frecuencia de cambio de cartuchos filtrantes, así como posibles usos de diferentes tipos o diferentes grados de filtración.

- * Paradas de la planta, duración, productos empleados para protección de los módulos de OI.

- * Calibrado de manómetros y medidores.

LISTA DE SIMBOLOS

a	= Alimentación
AC	= Acetato de celulosa.
BA	= Bomba alimentación.
BAP	= Bomba alta presión.
BC	= Bomba captación.
C	= Parámetro de saturación del CaCO_3 .
C_a	= Concentración alimentación.
C_c	= Concentración de coloides.
CDV	= Conductividad.
c_i	= Concentración del ión i presente en el agua.
C_p	= Concentración producto.
C_{pH}	= Coeficiente de pH.
C_r	= Concentración rechazo.
CTB	= Contenido total bacteriano.
F_a	= Flujo alimentación.
FA_p	= Factor de atascamiento a presión p.
FC	= Factor de concentración.
FI	= Fuerza iónica.
F_p	= Flujo producto o Producción.
F_r	= Flujo rechazo
FR	= Factor de recuperación.
K	= Constante de fuerza iónica.
K_{ec}	= Constante de estabilidad coloidal.
K_s	= Producto de solubilidad.
LSI	= Índice de saturación de Langelier.
m_i	= Molalidad / Molaridad del ión i presente en el agua.
MOI	= Modulo de OI.
N	= Potencia.
OI	= Osmosis inversa.

P	= Presión.
P	= Producto.
PA	= Poliamida.
PC	= Polarización de la concentración.
p-Ca	= Parámetro de saturación del CaCO_3 (Ídem p-[Ca^{2+}] _r).
PD	= Presión diferencial.
PE	= Polietileno.
p- HCO_3	= Parámetro de saturación del CaCO_3 (Ídem p-[HCO_3^-] _r).
PI	= Producto iónico.
Pm _i	= Peso molecular (iónico) del ión i presente en el agua.
PO	= Presión osmótica.
P _s	= Paso de sales.
PV	= Contenedor o Tubo de presión (Pressure Vessel).
PZ	= Potencial zeta.
Q	= Caudal.
r	= Rechazo.
R	= Recuperación o Conversión del sistema de OI.
R _s	= Rechazo de sales.
S	= Saturación.
S&DSI	= Índice de saturación de Stiff y Davis.
SDI	= Índice de atascamiento o ensuciamiento.
STD	= Sales totales disueltas.
t	= Tiempo.
T	= Temperatura.
TFC	= Thin Film Composite.
Z _i	= Carga iónica del ión i presente en el agua.
η_b	= Rendimiento bomba.
η_m	= Rendimiento motor.
π	= Presión osmótica.

REFERENCIAS

- (1) *Reverse Osmosis and Synthetic Membranes*. E. S. Sourirajan. National Research Council Canada, Division of Chemistry. Ottawa, Canada, K1A OR6. (1977).
- (2) *Reverse Osmosis Technical Manual*. Office of Water Research and Technology (OWRT). OWRT TT/80 2. July (1979).
- (3) *Reverse Osmosis Principles and Applications*. Fluid Systems Division of UOP Inc. September (1974).
- (4) *Permasep Engineering Manual*. E. Du Pont de Nemours & Co. December (1982).
- (5) *Filmtec Membranes Technical Manual*. Filmtec Corporation. Dow Chemical Co. April (1995).
- (6) S. Loeb and S. Sourirajan. University of California at Los Angeles. USA. Engineering Report No. 60-66 (1961).
- (7) Membranas FT-30 de Filmtec Corporation (Dow Chemical Company). *Filmtec Technical Bulletin*.
- (8) Membranas PA-300 de Fluid Systems. *TFC Spiral Wound Elements*.
- (9) Membranas PEC-1000 de Toray Industries, Inc. (Japón).
- (10) Membranas NCM-1 de Hydranautics (USA). *Thin Film Composite Products*.
- (11) Permeadores B-9 y B-10 de DuPont Co. *Permasep Product Bulletin* 301, 401.
- (12) Standard Test Method. American Society for Testing and Materials (ASTM). *Annual Book*. Designation: D 4189-82. (1982).
- (13) *Water Quality and Treatment*, 4th Edition. Prepared by the American Water Works Association. McGraw-Hill, Inc. New York. (1990).
- (14) *Water Treatment Handbook*. Degremont Company, 6th Ed. (1991).
- (15) *Standard Practice for Calculation and Adjustment of the Langelier Saturation Index for Reverse Osmosis*. American Society for Testing and Materials (ASTM). *Annual Book*. Designation: D 3739-88. (1988).
- (16) *Standard Practice for Calculation and Adjustment of the Stiff and Davis Stability Index for Reverse Osmosis*. American Society for Testing and Materials (ASTM). *Annual Book*. Designation: D 4582-86. (1986).

- (17) *Standard Practice for Calculation and Adjustment of Sulphate Scaling Salts (CaSO₄, SrSO₄, and BaSO₄) for Reverse Osmosis.* American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book. Designation: D 4692-87. (1987).
- (18) M. Al-Shammiri, A. Salman, S. Al-Shammari, M. Ahmad. *Simple program for the estimation of scaling potential in RO systems.* Desalination, 184, 139-147. (2005).
- (19) The Solubility of Amorphous Silica in Water. Alexander, G.B., Hester, W.M., Iler, R.K. *Journal of Physical Chemistry*, 58. (1954).
- (20) *Standard Practice for Calculation and Adjustment of Silica (SiO₂) Scaling for Reverse Osmosis.* American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book. Designation: D 4993-89. (1989).

CAPITULO IV: TERMODINÁMICA DEL PROCESO

4.1.- Introducción.

4.2.- Presiones osmóticas.

4.1.- Introducción.

Consideremos un dispositivo como el indicado en la figura adjunta, donde tenemos dos recipientes separados por una membrana semipermeable. En el recipiente 1 tenemos una mezcla de dos gases ideales que denominamos A y B, y en el recipiente 2 tenemos el gas ideal puro A. Siendo la membrana permeable a A e impermeable a B.

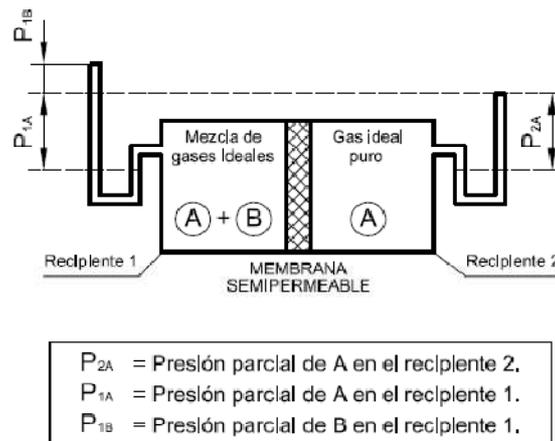


FIGURA F-IV/1

Bajo condiciones de equilibrio ocurre que la presión parcial del componente que puede pasar a través de la membrana es igual en ambos compartimentos, es decir:

$$P_{2A} = P_{1A}$$

En este caso, en el recipiente 1 tenemos un exceso de presión causado por el componente B.

Este exceso de presión no es observado en el gas del recipiente 2, porque de alguna manera es compensado por la membrana al impedir el libre tránsito del componente B. En efecto, en un balance de presiones es la membrana la que contrarresta los efectos del componente que no puede pasar y así se estima la función de la membrana. De manera que si observáramos unos manómetros colocados en el

dispositivo experimental, el sistema conserva su equilibrio, acusando una diferencia de presiones. En este caso, nótese como la presión osmótica es la presión parcial del componente que no puede pasar a través de la membrana:

$$\pi = P_{1B}$$

A este efecto, algunos autores suelen llamarlo “efecto de manómetro”, porque son estos los que señalan la diferencia de presiones cuando el sistema está en equilibrio. Este hecho tiene una consecuencia importante cuando el sistema está fuera del equilibrio, puesto que la diferencia de presión del componente que puede pasar no será igual a la diferencia de presión registrada por los manómetros.

Si consideramos:

Δp , diferencia de presión a ambos lados de la membrana (medida),

Entonces:

$\Delta p - \pi$, es la caída de presión del componente que puede pasar a través de la membrana.

La corrección a la presión medida (Δp) por la presión osmótica (π) es para evitar el exceso de presión del componente que no puede pasar y que los manómetros registran, aunque sin importancia en el flujo a través de la membrana. El efecto de manómetro nos hace considerar la naturaleza del flujo osmótico, ya que en la explicación que hemos dado con gases ideales se indica que la presión osmótica aparece como una corrección entre una predicción teórica y su ajuste experimental. Asimismo, observaremos a continuación que el dispositivo empleado con gases ideales no indica a simple vista la causa del flujo osmótico.

Si consideramos que el dispositivo experimental de la figura no se encuentra en equilibrio, es decir:

$$P_{2A} \neq P_{1A}$$

Entonces, se obtendrá un flujo de la especie A (que puede transitar libremente a través de la membrana), producido por la diferencia entre las presiones P_{2A} y P_{1A} . Ahora demostraremos que este flujo no es osmótico. La demostración es muy simple, porque en un gas ideal la presión parcial es proporcional a la concentración, de manera que el flujo es causado por una diferencia de concentraciones de la especie A, a través de la membrana, y bien se sabe que es un flujo de difusión que se ajusta a la Ley de Fick de la difusión. Por lo que respecta al flujo osmótico es no difusivo y equivalente al causado por una diferencia de presiones. En nuestro caso, en un estado de no equilibrio, además del flujo difusivo del componente A, observaríamos un flujo del mismo componente A causado por $\pi = P_{1B}$.

Para observar de dónde surge este término en nuestras ecuaciones, es necesario utilizar el formalismo completo de la teoría cinética de Boltzmann, para encontrar que, en efecto, es la presión osmótica de los componentes por lo que no pueden pasar por la membrana, y son los que producen el flujo osmótico. Pero este término aparece junto al que origina el flujo viscoso. Es decir, el flujo osmótico puede interpretarse como un flujo viscoso, producido por los movimientos térmicos moleculares cuando son interrumpidos por una pared porosa (membrana).

A continuación se explica la teoría termodinámica de la presión osmótica y sus aspectos experimentales.

Anteriormente habíamos deducido que,

$$\pi = P_{1B} \quad (\text{Ec.1/4})$$

Y también que la condición de equilibrio del gas que puede pasar hacia ambos lados de la membrana está representada por la igualdad de las presiones parciales del gas A.

$$P_{2A} = P_{1A} \quad (\text{Ec.2/4})$$

La sencillez de las ecuaciones (Ec.1/4) y (Ec.2/4) se establece por tratarse de gases ideales; evidentemente dejan de ser válidas para cualquier caso que se presente en la naturaleza cuando no sean gases diluidos.

Sin embargo, el esquema fisicoquímico de los gases ideales se preserva en general para cualquier sustancia, si se reemplaza la presión parcial de un componente por el respectivo potencial químico, multiplicado por su concentración. En tal caso y en general, en lugar de las ecuaciones (Ec.1/4) y (Ec.2/4) aplicaremos las siguientes:

$$\text{Para el soluto:} \quad \pi = \Delta p = C_B \mu_{B1} \quad (\text{Ec.3/4})$$

$$\text{Para el solvente:} \quad \mu_{A1} = \mu_{A2} \quad (\text{Ec.4/4})$$

Donde, Δp es la diferencia de presiones en ambos lados de la membrana, μ_{B1} , μ_{A1} y μ_{A2} , representan los potenciales químicos de los componentes B y A respectivamente, así como C_B su concentración.

Las ecuaciones (Ec.3/4) y (Ec.4/4) representan las condiciones generales del equilibrio entre un solvente y un soluto a través de una membrana semipermeable y no representan ecuaciones independientes, ya que básicamente contienen la misma información. Esto significa que tendremos el mismo valor de la presión osmótica en cada una de las ecuaciones, lo cual se debe a que, en una situación de equilibrio, el cambio de presión es compensado por medio del efecto de las concentraciones, de manera que se cumpla la igualdad de los potenciales químicos. De aquí se entenderá el papel central que juega el concepto de presión osmótica en las ecuaciones termodinámicas.

Ya hemos visto como se calcula la presión osmótica considerando la ecuación (Ec.4/4), y se hace notar que es equivalente al valor dado por la ecuación (Ec.3/4).

Ahora bien, si el sistema se encuentra fuera de equilibrio, las ecuaciones (Ec.3/4)

y (Ec.4/4) no tienen la misma información, en vista de que:

$$\Delta p \neq \pi$$

Por lo que en tal caso se producen las desigualdades siguientes:

$$C_B \Delta \mu_B \neq \Delta p \quad (\text{Ec.5/4})$$

$$\Delta \mu_B \neq 0 \quad (\text{Ec.6/4})$$

El símbolo Δ en las ecuaciones (Ec.5/4) y (Ec.6/4) significa la diferencia del potencial químico en ambos lados de la membrana.

La respuesta del sistema fuera de equilibrio es producir un flujo para restaurar las condiciones de equilibrio; y dado que el único componente que puede fluir es el solvente, sobre éste ocurren dos tipos de urgencias para lograr que las desigualdades (Ec.5/4) y (Ec.6/4) restablezcan los valores de equilibrio que satisfacen a (Ec.3/4) y (Ec.4/4). Una de estas urgencias relacionada con la desigualdad 5/4 está representada por la presencia del flujo de difusión. En cambio, la representada por la desigualdad 6/4 es el flujo osmótico. Las dos respuestas del sistema para lograr el equilibrio son de naturaleza distinta, ya que el flujo osmótico involucra un flujo convectivo. No obstante, esta conclusión no deriva de las ecuaciones aquí tratadas sino de una teoría de transporte (Capítulo V).

Resulta interesante destacar que la medida obtenida de la presión osmótica sólo tiene sentido si el sistema está en equilibrio, por lo que suele definirse como la presión que debe ser aplicada a una solución para lograr que el potencial químico del solvente en la solución sea igual al potencial del solvente puro a la misma temperatura. No obstante, el concepto de presión osmótica así definido no tiene una relación con el flujo osmótico. Es más, en el caso de que el flujo osmótico eleve una columna líquida para producir un exceso de presión y así restituir el equilibrio, la presión osmótica parece ser una consecuencia del flujo osmótico, contrariamente a lo que se pudiera pensar

respecto a que la presión es la causa de un flujo asociado.

De acuerdo al bosquejo histórico que hemos planteado, la ecuación matemática rigurosa de la presión osmótica no fue la propuesta por la termodinámica clásica sino la aproximación para soluciones diluidas, que asemeja la forma de la ecuación del estado de un gas ideal:

$$\pi = N_B RT \quad (\text{Ec.7/4})$$

Donde N_B es el número de moles de soluto en la solución por unidad de volumen, R es la constante de los gases y T la temperatura absoluta.

Esta ecuación fue propuesta originalmente por Van't Hoff, interpretando los primeros experimentos de precisión realizados por el alemán Wilhelm Pfeffer (1877).

Fue entonces cuando se creyó que la presión osmótica era un parámetro del estado de una solución, independientemente de la presencia de una membrana. Ya hemos anotado antes que tal interpretación es errónea, ya que el concepto de presión osmótica aparece como una constricción necesaria para mantener al sistema en un estado de equilibrio. La ecuación de Van't Hoff es válida para soluciones diluidas y se utiliza en situaciones donde los cambios de la concentración debidos al flujo osmótico son pequeños.

4.2.- Presiones osmóticas.

4.2.1.- Ecuación general.

De acuerdo al Capítulo III, la presión mínima efectiva y necesaria para provocar el flujo de agua a través de la membrana semipermeable, en el proceso de OI, debe ser superior a la diferencia entre las presiones osmóticas de las soluciones a ambos lados de la membrana.

El conocimiento de las presiones osmóticas, es pues uno de los requisitos fundamentales a considerar, para evaluar el rendimiento de la membrana empleada en cualquier planta de desalación por OI.

La presión osmótica de una solución depende de la temperatura, concentración y tipos de partículas presentes en la misma.

Las concentraciones típicas de casi todas las aguas susceptibles de tratamiento de desalación por OI, requieren que debe ser tomada en cuenta la no idealidad de las soluciones. A este efecto, la más conveniente representación, es la que introduce el concepto de "coeficiente osmótico", que para soluciones cuyo disolvente es agua, se define por la ecuación:

$$\varphi = - (55,51 \cdot \text{Lna}_o) / (\Sigma m_i + \Sigma M_j) \quad (\text{Ec.8/4})$$

En la que los subíndices i y j representan, respectivamente, los componentes iónicos y no iónicos presentes en la solución. Siendo:

φ = Coeficiente osmótico del agua salina.

a_o = Actividad del disolvente (agua) en la solución.

m_i = Concentración molal del ión i en la solución (moles/ kg H₂O).

M_j = " del componente j en moles/kg H₂O.

Obteniéndose la presión osmótica (π) de un agua salina, a partir de la ecuación de Van't Hoff, (Ec.7/4), escrita en la siguiente forma:

$$\pi = - [R \cdot (T + 273,15) / V_o] \cdot \text{Lna}_o \quad (\text{Ec.9/4})$$

Siendo:

π = Presión osmótica de la solución en atm.

R = Constante de los gases (0,082 atm.l / mol.K).

V_o = Volumen molal parcial del agua.

T = Temperatura en grados centígrados.

A partir de las ecuaciones (Ec.8/4) y (Ec.9/4), las presiones osmóticas de aguas salinas, pueden ser calculadas con una buena aproximación, considerando el volumen molal parcial del agua en la solución (V_o), independiente de la presión y concentración de la solución, por ser pequeña su variación con ambas. Por lo que la anterior ecuación (Ec.9/4) puede escribirse en la forma:

$$\pi = [R \cdot (T + 273,15) / (55,51 \cdot V_o)] \cdot \phi \cdot (\sum m_i + \sum M_j) \quad (Ec.10/4)$$

Siendo V_o el volumen molal del agua pura a 1 atm de presión.

Valores de $[R \cdot (T + 273,15) / (55,51 \cdot V_o)]$, para diferentes temperaturas del agua, se muestran en la *Tabla T-IV/1*.

TABLA T-IV/1

T (°C)	$R(T+273,15)/ 55,51 \cdot V_o$
0	22,4
10	23,2
20	24,0
25	24,4
30	24,8
50	26,2
75	27,8

R = Constante de los gases (0,082 atm.l/mol.K)

T = Temperatura del agua (°C)

V_o = Volumen molal del agua pura a 1 atm.

4.2.2.- Determinaciones experimentales.

Varios autores, entre ellos R. W. STOUGHTON y M. H. LIETZKE (1) (2), empleando valores de ϕ por ellos obtenidos, determinaron las presiones osmóticas de aguas salinas, a partir de la ecuación (Ec.10/4), para distintas soluciones de cloruro sódico, considerando las variaciones de V_o con la composición (Tabla T-IV/2) y para soluciones representativas de aguas de mar típicas (Tabla T-IV/3). En ambos casos, a distintas temperaturas.

TABLA T-IV/2

ppm NaCl	25°C	40°C	60°C
60	0,05	0,05	0,05
600	0,47	0,49	0,52
3.000	2,31	2,41	2,53
6.000	4,56	4,76	5,00
12.000	9,04	9,44	9,93
24.000	18,02	18,84	19,83
35.000	27,12	28,40	29,92
48.000	36,37	38,14	40,22
60.000	45,80	48,08	50,76

TABLA T-IV/3

STD (mg/l)	25°C	40°C	60°C
10.000	7,1	7,4	7,8
20.000	14,3	14,9	15,7
34.500	25,1	26,3	27,7
50.000	37,5	39,3	41,5
75.000	59,3	62,4	65,9
100.000	84	89	94

4.2.3.- Aplicación al proceso de desalación por OI.

Teniendo en cuenta que la temperatura máxima de operación de las membranas más avanzadas, actualmente empleadas a nivel industrial, para desalación de aguas, es inferior a 50°C. Resulta aceptable, a estos efectos, la aproximación de $V_o \approx 1/55,51$ (Tabla T-IV/1).

Por lo que para estas aplicaciones, la ecuación (Ec.10/4) puede escribirse en una

forma más práctica:

$$\pi = R(T+273,15)\varphi(\Sigma m_i + \Sigma M_j) = 0,082(T+273,15)\varphi(\Sigma m_i + \Sigma M_j) \quad (Ec.11/4)$$

Expresándose π en atm.

Si se expresa π en kPa (1 atm \approx 101,32 kPa), la ecuación anterior sería equivalente a:

$$\pi = 8,308 \cdot \varphi(T+273,15)(\Sigma m_i + \Sigma M_j) \quad (Ec.12/4)$$

Ecuación propuesta por la ASTM (3).

4.2.3.1.- Cálculo del coeficiente osmótico.

La estimación de la presión osmótica de un agua salina incluye, por tanto, el conocimiento del coeficiente osmótico de la misma.

A primera vista, y con la infinidad de composiciones posibles, esto parece dificultoso. Sin embargo debido a que la composición de casi todas las aguas naturales de interés en desalación, incluyen fundamentalmente iones Na^+ , Cl^- , Mg^{++} , SO_4^{--} , Ca^{++} , K^+ , HCO_3^- y NO_3^- . Para propósitos prácticos, normalmente será suficiente determinar φ , considerando el soluto compuesto solo por los 4 primeros iones (sodio, magnesio, cloruros y sulfatos), añadiendo luego las molalidades de los restantes iones presentes en el agua, a aquellas de estos cuatro que correspondan y tengan la misma valencia (p.e. el calcio al magnesio, el potasio al sodio, bicarbonatos y nitratos a cloruros, etc.).

Existen en la literatura, ecuaciones empíricas para la determinación de los coeficientes osmóticos de soluciones conteniendo estos cuatro iones, deducidas a través de medidas experimentales (G. SCATCHARD, R. M. RUSH y J. S. JOHNSON Jr.) (4). Sin embargo estas ecuaciones no se presentan como convenientes, a la hora de elaborar un procedimiento práctico de cálculo.

A este efecto, ofrecen un resultado más útil, las tablas de coeficientes osmóticos obtenidas por R. E. MINTURN, para la Office of Saline Water (Membrane Division), U. S. Department of the Interior (5). Estas tablas para la obtención de los coeficientes osmóticos, permiten la estimación de las presiones osmóticas, a partir de ellas, con una buena seguridad para las diversas composiciones de casi todas las aguas naturales de interés en desalación, de acuerdo al trabajo de L. DRESNER y J. S. JOHNSON Jr. (6).

Las tablas comprenden un rango de concentraciones totales equivalentes de 0,0025 a 2 equivalentes/kg H₂O. Para cada una de las concentraciones, se dispone de la correspondiente sub-tabla, con indicación de los valores de ϕ en función de las fracciones equivalentes de los cuatro iones mencionados.

4.2.3.2.- Concentraciones y fracciones equivalentes.

El procedimiento de cálculo de los coeficientes osmóticos (ϕ), del apartado anterior presupone el conocimiento de los siguientes conceptos:

A) Concentración parcial equivalente:

La concentración parcial equivalente o molalidad parcial equivalente (m_i') del ión i presente en la solución, es el total de equivalentes de dicho ión por kg de disolvente (H₂O). Por tanto:

$$m_i' = m_i \cdot z_i = (c_i \cdot z_i) / [Pm_i \cdot (1000 - STD/1000)] \quad (Ec.13/4)$$

en la cual:

m_i' = Concentración parcial equivalente del ión i (eq/kg H₂O).

m_i = Concentración molal del ión i en la solución (moles/kg H₂O).

z_i = Carga iónica del ión i.

c_i = Concentración del ión i en la solución, en mg/l (mg/l \approx ppm).

Pm_i = Peso molecular del ión i o peso iónico expresado en gramos.

STD = Sólidos totales disueltos, en mg/l (mg/l \approx ppm).

B) Concentración total equivalente:

La concentración total equivalente o molalidad total equivalente (M') de una solución, es la semisuma de las concentraciones parciales equivalentes de todos los iones presentes en la solución. Por tanto:

$$M' = \frac{1}{2} \sum m_i' \quad (\text{Ec.14/4})$$

C) Fracción equivalente:

Fracción equivalente de un catión n (FE_n^+) o de un anión m (FE_m^-) presente en una solución, es el porcentaje de concentración parcial equivalente de dicho catión (anión), respecto de la suma de las concentraciones parciales equivalentes de todos los cationes (aniones) presentes en la solución. Esto es:

$$FE_n^+ = m_n' / \sum m_i' \quad (\text{Ec.15/4})$$

$$FE_m^- = m_m' / \sum m_j' \quad (\text{Ec.16/4})$$

Siendo:

m_n' = Concentración parcial equivalente del catión n.

$\sum m_i'$ = Suma de las concentraciones parciales equivalentes de todos los cationes

presentes en la solución (mono y divalentes).

m_m' = Concentración parcial equivalente del anión m.

$\Sigma m_j'$ = Suma de las concentraciones parciales equivalentes de todos los aniones presentes en la solución (mono y divalentes).

4.2.3.3.- Procedimiento de cálculo de la presión osmótica.

Según el método propuesto, el procedimiento de cálculo de la presión osmótica (π) de un agua salina dada, será como sigue:

1º) A partir de las concentraciones iónicas del agua en estudio (análisis químico), aplicando la ecuación (Ec.13/4), se determinan las concentraciones parciales equivalentes de todos los iones mono y divalentes presentes en la misma (m_i').

2º) Con los resultados anteriores, se calculan las sumas de concentraciones parciales equivalentes de cationes monovalentes (m_{1+}'), de cationes divalentes (m_{2+}'), de aniones monovalentes (m_{1-}') y de aniones divalentes (m_{2-}'). Esto es:

$$m_{1+}' = m_{Na}' + m_{K}' + \text{etc.} \quad (\text{Ec.17/4})$$

$$m_{2+}' = m_{Ca}' + m_{Mg}' + \text{etc.} \quad (\text{Ec.18/4})$$

$$m_{1-}' = m_{Cl}' + m_{HCO_3}' + m_{NO_3}' + \text{etc.} \quad (\text{Ec.19/4})$$

$$m_{2-}' = m_{SO_4}' + \text{etc.} \quad (\text{Ec.20/4})$$

3º) Se determina la concentración total equivalente, aplicando la ecuación (Ec.14/4), y que será:

$$M' = \frac{1}{2} \sum m_i' = \frac{1}{2} (m_{1+}' + m_{2+}' + m_{1-}' + m_{2-}') \quad (Ec.21/4)$$

4º) A partir de las ecuaciones (Ec.15/4) y (Ec.16/4), se calculan las fracciones equivalentes de cationes y aniones monovalentes, y que, con arreglo a las determinaciones anteriores, serán:

$$FE1^+ = m_{1+}' / (m_{1+}' + m_{2+}') \quad (Ec.22/4)$$

$$FE1^- = m_{1-}' / (m_{1-}' + m_{2-}') \quad (Ec.23/4)$$

5º) Con los cálculos de los apartados anteriores y usando las tablas, se determina el coeficiente osmótico (φ), en la forma que a continuación se indica (Ver apartado 4.2.4: Ejemplo de aplicación):

5-1) Con el valor de M' , obtenido por aplicación de la ecuación (Ec.21/4), se selecciona la subtabla correspondiente. Si el valor de esta no es exacto o aproximado al de M' , se eligen las subtablas que correspondan a los valores inmediatos inferior y superior, al objeto de una posterior interpolación.

5-2) En la(s) subtabla(s) anteriormente seleccionada(s), se elige a su vez, la(s) columna(s) que corresponda(n) al valor de $FE1^+$, obtenido por aplicación de (Ec.22/4), dentro del conjunto de valores de la fila superior, correspondiente a fracciones equivalentes del catión Na.

5-3) En la(s) misma(s) subtabla(s), se selecciona(n) así mismo, la(s) fila(s) que corresponda(n) al valor de $FE1^-$, obtenido según (Ec.23/4) y dentro del conjunto de valores de la columna situada a la izquierda de la subtabla(s) y correspondiente a fracciones equivalentes del anión cloruro.

5-4) La intersección de la(s) columna(s) seleccionada(s) en (5-2), con la(s) fila(s) seleccionada(s) en (5-3), determina el valor del coeficiente osmótico del agua analizada, bien directamente o a través de posteriores interpolaciones entre tablas, columnas y/o

filas adyacentes.

6º) Con la obtención de ϕ y la temperatura del agua en estudio, se calcula la presión osmótica de esta, por aplicación de la ecuación (Ec.11/4) o (Ec.12/4), según se desee expresar π en atm o kPa:

$$\pi \text{ (atm)} = 0,082(T+273,15)\phi(m_{1+}' + m_{1-}' + \frac{1}{2}m_{2+}' + \frac{1}{2}m_{2-}' + \text{etc.}) \quad (\text{Ec.24/4})$$

4.2.3.4.- Cálculo simplificado.

Con objeto de simplificar los cálculos (Ver Capítulo VII, apartado 7.3.4), la ASTM (3) ha propuesto, para la determinación de la presión osmótica de aguas salobres, la consideración de $\phi = 0,93$. Con lo que las ecuaciones (Ec.11/4) y (Ec.24/4) quedan en una forma más simple:

$$\pi \text{ (atm)} = 0,076(T+273,15)(m_{1+}' + m_{1-}' + \frac{1}{2}m_{2+}' + \frac{1}{2}m_{2-}' + \text{etc.})$$

$$\pi \text{ (atm)} = 0,076(T+273,15) \Sigma m_i \quad (\text{Ec.25/4})$$

Siendo, en este caso: Σm_i = Suma de las molalidades de todos los constituyentes de la solución, tanto iónicos como no iónicos.

4.2.4.- Ejemplo de aplicación.

Consideremos el agua salobre, procedente de pozo, que constituye el agua de alimentación inicial de la planta de desalación, cuyos datos se aportan a este trabajo de tesis (Capítulo VI). Según el apartado 6.1 de dicho Capítulo, el agua a tratar tiene una temperatura de 22°C y presenta las composiciones iónicas reflejadas en la tabla adjunta.

TABLA T-IV/4

ION	CARGA IONICA	PESO IONICO	CONCENTRACIONES IONICAS		
	Z_i	Pm_i	C_i (mg/l)	m_i (moles/kg H ₂ O)	m_i' (eq./kg H ₂ O)
Na ⁺	1	22,9	955	0,0417	0,0417
K ⁺	1	39,10	32,3	0,0008	0,0008
Ca ⁺⁺	2	40,08	96,1	0,0024	0,0048
Mg ⁺⁺	2	24,32	139,7	0,0058	0,0116
HCO ₃ ⁻	1	61,02	668,7	0,0110	0,0110
Cl ⁻	1	35,46	963	0,0273	0,0273
NO ₃ ⁻	1	62,00	382,5	0,0062	0,0062
SO ₄ ⁼	2	96,07	695,2	0,0073	0,0146
SiO ₂	3($\sqrt{V_{SiO_2}}$)	60,09	35	0,0006(M_{SiO_2})	
STD			3968		

A partir de los valores anteriores, aplicando las ecuaciones (Ec.17/4), (Ec.18/4), (Ec.19/4) y (Ec.20/4), obtenemos:

$$* \quad m_{1+}' = m_{Na}' + m_{K}' = 0,0425$$

$$* \quad m_{2+}' = m_{Ca}' + m_{Mg}' = 0,0164$$

$$* \quad m_{1-}' = m_{Cl}' + m_{HCO_3}' + m_{NO_3}' = 0,0445$$

$$* \quad m_{2-}' = m_{SO_4}' = 0,0146$$

Con los valores anteriores, calculamos la concentración total equivalente, aplicando la ecuación (21/4):

$$* \quad M' = \frac{1}{2} \sum m_i' = \frac{1}{2} (m_{1+}' + m_{2+}' + m_{1-}' + m_{2-}') = 0,059$$

Las fracciones equivalentes de cationes y aniones monovalentes, según las ecuaciones (22/4) y (23/4), serán:

$$* \quad FE1^+ = m_{1+}' / (m_{1+}' + m_{2+}') = 0,72$$

* $FE1^- = m_1 / (m_1 + m_2) = 0,75$

De acuerdo al valor de M' (0,059), y según 4.2.3.3 en su apartado. 5-1, en las tablas para la obtención de los coeficientes osmóticos, elegimos las subtablas correspondientes a 0,05 y 0,1 eq./kg H₂O. Y para cada una de ellas, según 4.2.3.3 en su apartado 5-2, elegimos las columnas correspondientes a los valores de las fracciones equivalentes de sodio ($FE1^+ = 0,72$) de 0,7 y 0,8. Así mismo tomaremos, según el apartado 5-3, las filas correspondientes a los valores de las fracciones equivalentes del anión cloruro ($FE1^- = 0,75$) de 0,7 y 0,8 (Tablas T-IV/5 y T-IV/6).

TABLA T-IV/5

CONCENTRACION TOTAL EQUIVALENTE = 0.05 eqv / kg H2O

		FRACCION EQUIVALENTE DE SODIO										
		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
FRACCION EQUIVALENTE DE CLORURO	0.0	0.710	0.731	0.751	0.769	0.795	0.800	0.813	0.826	0.837	0.848	0.858
	0.1	0.735	0.754	0.772	0.798	0.802	0.816	0.828	0.840	0.850	0.860	0.869
	0.2	0.757	0.775	0.791	0.805	0.819	0.831	0.842	0.853	0.863	0.872	0.880
	0.3	0.778	0.794	0.808	0.821	0.834	0.845	0.855	0.865	0.874	0.882	0.890
	0.4	0.797	0.811	0.824	0.836	0.847	0.858	0.867	0.876	0.884	0.892	0.899
	0.5	0.814	0.827	0.839	0.850	0.860	0.870	0.878	0.887	0.894	0.901	0.908
	0.6	0.830	0.842	0.853	0.863	0.872	0.881	0.889	0.896	0.903	0.910	0.916
	0.7	0.845	0.855	0.865	0.875	0.883	0.891	0.899	0.906	0.912	0.918	0.924
	0.8	0.858	0.868	0.877	0.886	0.893	0.901	0.909	0.914	0.920	0.926	0.931
	0.9	0.871	0.880	0.888	0.896	0.903	0.910	0.916	0.922	0.928	0.933	0.938
	1.0	0.882	0.890	0.898	0.905	0.912	0.918	0.924	0.930	0.935	0.940	0.944

TABLA T-IV/6

CONCENTRACION TOTAL EQUIVALENTE = 0.10 eqv / kg H2O

		FRACCION EQUIVALENTE DE SODIO										
		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
FRACCION EQUIVALENTE DE CLORURO	0.0	0.655	0.679	0.702	0.722	0.741	0.758	0.773	0.787	0.801	0.813	0.824
	0.1	0.685	0.707	0.727	0.746	0.762	0.778	0.792	0.805	0.817	0.828	0.839
	0.2	0.713	0.733	0.751	0.767	0.782	0.796	0.809	0.821	0.832	0.842	0.852
	0.3	0.738	0.756	0.772	0.787	0.801	0.813	0.825	0.836	0.846	0.856	0.864
	0.4	0.761	0.777	0.792	0.805	0.818	0.829	0.840	0.850	0.859	0.868	0.876
	0.5	0.782	0.797	0.810	0.822	0.834	0.844	0.854	0.863	0.872	0.880	0.887
	0.6	0.801	0.815	0.827	0.838	0.849	0.858	0.867	0.876	0.883	0.891	0.897
	0.7	0.819	0.831	0.843	0.853	0.862	0.871	0.879	0.887	0.894	0.901	0.907
	0.8	0.836	0.847	0.857	0.866	0.875	0.883	0.891	0.898	0.904	0.911	0.916
	0.9	0.852	0.861	0.871	0.879	0.887	0.895	0.901	0.908	0.914	0.920	0.925
	1.0	0.866	0.875	0.883	0.891	0.898	0.905	0.912	0.917	0.923	0.928	0.933

Obteniéndose:

a) M' = 0,05 , FE(Na) = 0,72 y FE(Cl) = 0,75:

- FE(Na) = 0,7 y FE(Cl) = 0,7..... $\phi_1 = 0,906$ \lrcorner
- FE(Na) = 0,8 y FE(Cl) = 0,7..... $\phi_2 = 0,912$ \lrcorner |
- FE(Na) = 0,7 y FE(Cl) = 0,8..... $\phi_3 = 0,914$ \lrcorner |
- FE(Na) = 0,8 y FE(Cl) = 0,8..... $\phi_4 = 0,920$ \lrcorner

Interpolando y sustituyendo valores:

$$\phi_a = \phi_1((0,1-0,05)/0,1) + (\phi_2-\phi_1)(0,02/0,1)((0,1-0,05)/0,1) + \phi_3(0,05/0,1) + (\phi_4-\phi_3)(0,05/0,1)(0,02/0,1) = \underline{0,912}$$

b) M' = 0,1 , FE(Na) = 0,72 y FE(Cl) = 0,75:

- FE(Na) = 0,7 y FE(Cl) = 0,7..... $\varphi_1 = 0,887$ \uparrow
- FE(Na) = 0,8 y FE(Cl) = 0,7..... $\varphi_2 = 0,894$ \downarrow $|$
- FE(Na) = 0,7 y FE(Cl) = 0,8..... $\varphi_3 = 0,898$ \uparrow $|$
- FE(Na) = 0,8 y FE(Cl) = 0,8..... $\varphi_4 = 0,904$ \downarrow

Interpolando y sustituyendo valores:

$$\varphi_b = \varphi_1((0,1-0,05)/0,1) + (\varphi_2-\varphi_1)(0,02/0,1)((0,1-0,05)/0,1) + \varphi_3(0,05/0,1) + (\varphi_4-\varphi_3)(0,05/0,1)(0,02/0,1) = \underline{0,894}$$

c) $M' = 0,059$, FE(Na) = 0,72 y FE(Cl) = 0,75:

Interpolando entre los valores de φ_a y φ_b obtenidos, determinamos el coeficiente osmótico de la solución. Por tanto:

$$\varphi = \varphi_a - (\varphi_a-\varphi_b)((0,059-0,05)/(0,1-0,05)) = \underline{0,909}$$

Con cuyo valor calculamos, finalmente la presión osmótica del agua considerada, aplicando la ecuación (Ec.24/4):

$$* m_{1+}' = m_{Na}' + m_{K}' = 0,0425$$

$$* m_{2+}' = m_{Ca}' + m_{Mg}' = 0,0164$$

$$* m_{1-}' = m_{Cl}' + m_{HCO_3}' + m_{NO_3}' = 0,0445$$

$$* m_{2-}' = m_{SO_4}' = 0,0146$$

$$\pi \text{ (atm)} = 0,082 (T+273,15) \varphi (m_{1+}' + m_{1-}' + \frac{1}{2}m_{2+}' + \frac{1}{2}m_{2-}' + \text{etc.}) = 0,082 (22+273,15) 0,909 (0,0425+0,0445+0,0082+0,0073+0,0006) = \underline{2,27}.$$

Aplicando la ecuación (Ec.25/4), para el cálculo simplificado, el resultado obtenido hubiese sido:

$$\pi \text{ (atm)} = 0,076(T+273,15) \Sigma m_i = 0,076 \times 295,15 \times 0,1031 = 2,32.$$

$\pi = \underline{2,32}$ atm (2,4 kg/cm² <> 34,1 psi), con una variación con respecto del anterior, inferior al 3%.

4.2.5.- Presiones osmóticas media y efectiva.

En la medida en la que, durante el proceso de OI en plantas de desalación, la corriente de alimentación se vuelve más concentrada durante su recorrido a lo largo de los módulos. Se hace preciso establecer una presión osmótica "*media*", que corresponda a la concentración media de operación del sistema de OI (alimentación-rechazo).

Debido a que no todos los iones presentes en el agua de alimentación son rechazados por igual, la concentración media alimentación-rechazo, y por tanto el valor de la presión osmótica media (π_{ar}), dependerá no solo de las características propias del agua y condiciones de operación (Temperatura, pH, presión, etc.), sino también del tipo y características de la membrana empleada. Sin embargo, a efectos de diseño, la expresión práctica más generalmente aceptada, propuesta por la ASTM **(9)** y suficientemente contrastada, es la siguiente:

$$\pi_{ar} = \pi_a \cdot FR \quad (Ec.26/4)$$

En la cual π_a es la presión osmótica del agua de alimentación a su entrada al sistema de OI y el coeficiente FR (Factor de recuperación del sistema), para desalación de aguas salobres, viene dado por:

$$FR = C_{ar} / C_a = (\text{LnFC}) / (R/100) \quad (Ec.27/4)$$

En la que C_{ar} y C_a son las concentraciones media alimentación-rechazo y de alimentación al sistema de OI, respectivamente. Siendo:

R = Recuperación o conversión del sistema de OI en %.

FC = Factor de concentración.

Definidos ambos en el Capítulo 3, y según la ecuación (Ec.15/3), expresando R y FC en %:

$$FC = 100 / (100-R) \quad (Ec.28/4)$$

Por lo que la ecuación (Ec.26/4), puede escribirse en la forma:

$$\pi_{ar} = \pi_a \frac{\ln[100/(100-R)]}{(R/100)} \quad (Ec. 29/4)$$

A efectos del valor de la presión osmótica del agua de alimentación, a su entrada al sistema de OI (π_a). Conviene tener presente que cualquier pretratamiento del agua (Capítulo III), que cambie la composición iónica de la misma, de acuerdo a los apartados anteriores, puede alterar el valor de π_a . Sería el caso, por ejemplo, de utilizar en la etapa de pretratamiento, ácido sulfúrico, ya que al transformar este parte de los iones HCO_3^- en SO_4^{2-} (Capítulo III, apartado.3.4.5), reduciría el valor de la presión osmótica.

A la hora de precisar el valor de la presión osmótica media, correspondiente a la concentración media "real" a la que opera un módulo o sistema de OI, en una planta de desalación, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1ª) El efecto de la "polarización de la concentración", definido en el Capítulo III, y que provoca una diferencia de concentraciones entre la corriente central o grueso del flujo de concentrado y la capa de este próxima a la superficie de la membrana (Figura F-III/5).

2ª) Debido al comportamiento no ideal de la membrana y/o a imperfecciones de la misma, el paso de sales produce la existencia de una presión osmótica diferencial entre ambos lados de la membrana.

Ambos efectos conducen al concepto de "presión osmótica efectiva", y sus consecuencias se analizan con más detalle en los capítulos que siguen.

LISTA DE SIMBOLOS

- a_o = Actividad del disolvente (agua) en la solución.
 C_a = Concentración alimentación.
 C_{ar} = Concentración media alimentación-rechazo.
 c_i = Concentración del ión i.
FC = Factor de concentración.
FE = Fracción equivalente.
FR = Factor de recuperación.
(M') = Concentración total equivalente o molalidad total equivalente.
 M_j = Concentración molal del componente j.
 m_i = Concentración molal del ión i.
 m_i' = Concentración parcial equivalente del ión i.
 Pm_i = Peso molecular del ión i o peso iónico expresado en gramos.
R = Recuperación o conversión en %.
STD = Sólidos totales disueltos.
T = Temperatura en grados centígrados.
 V_o = Volumen molal parcial del agua.
 z_i = Carga iónica del ión i.
 φ = Coeficiente osmótico.
 π = Presión osmótica de una solución.
 π_a = Presión osmótica del agua de alimentación.
 π_{ar} = Presión osmótica media alimentación-rechazo.

REFERENCIAS

- (1) Stoughton, R. W., M. H. Lietzke. *J. Chem. Eng. Data* 10, 254 (1965).
- (2) Stoughton, R. W., M. H. Lietzke. *J. Chem. Eng. Data* 12, 101 (1967).
- (3) American Society for Testing and Materials (ASTM). *Annual Book*. Designation: D 4516-85 (1985).
- (4) Scatchard, G., R. M. Rush, J. S. Johnson, Jr. *J. Phys. Chem. Eng.* 74, 3789 (1970).
- (5) Minturn, R. M. Office of Saline Water (Membrane Division). U. S. Department of the Interior. OSW 897, PB 224 767
- (6) Dresner, L., J. S. Johnson, Jr. *Principles of Desalination*. Chapter 8 (K. S. Splieger, ed), Part B, 411. Academic Press. (1980).

CAPITULO V: FENÓMENOS DE TRANSFERENCIA A TRAVÉS DE LAS MEMBRANAS

5.1.- Aplicación de los procesos de filtración por membranas.

5.2.- Ecuaciones de transporte.

5.3.- Polarización de la concentración.

5.4.- Influencias de la temperatura, compactación y ensuciamiento.

5.5.- Diseño del sistema de OI.

5.1.- Aplicación de los procesos de filtración por membranas.

Los procesos de filtración por membranas se clasifican según cuatro categorías generales: Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF), Nanofiltración (NF) y Osmosis Inversa (OI).

Los rangos de filtración de cada uno de ellos se muestran en la figura adjunta.

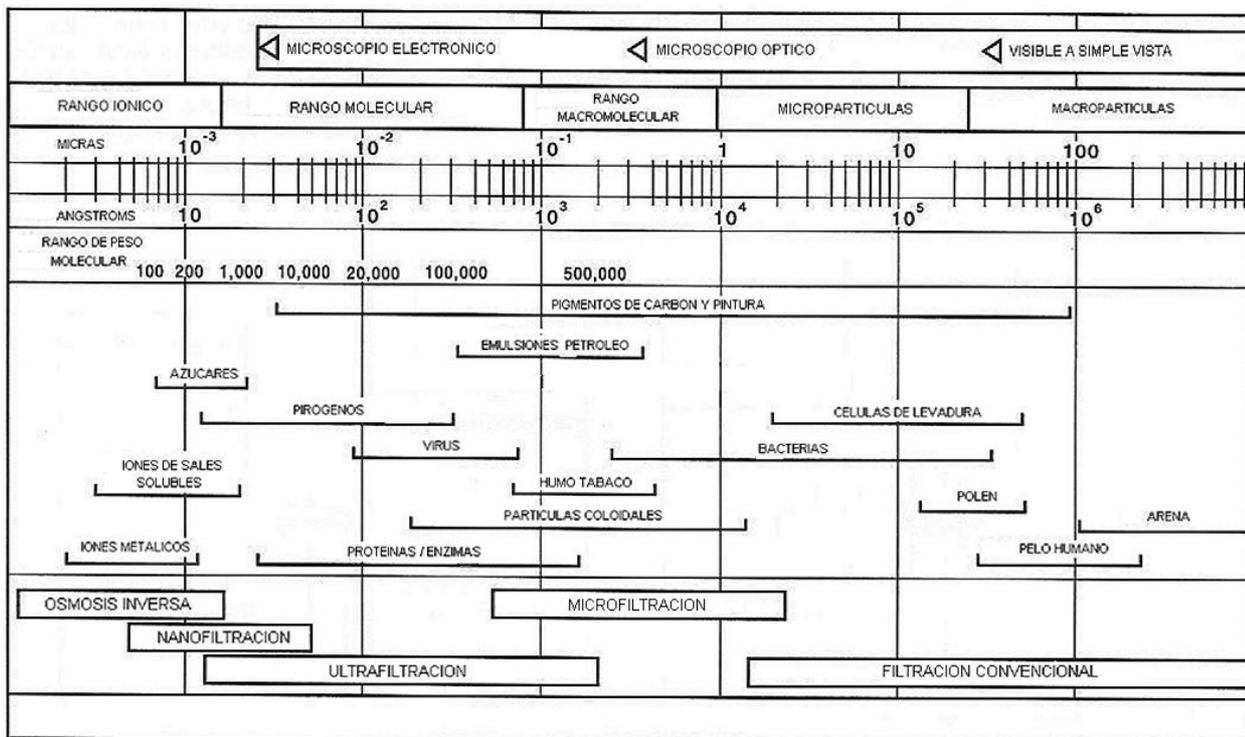


FIGURA F-V/1

De la que se desprenden las siguientes consideraciones:

Microfiltración:

Las membranas de MF filtran (rechazan) las partículas con tamaño aproximado comprendido en el rango de 0,1 a 1µm. Esto es, las partículas en suspensión y los coloides grandes, mientras que las macromoléculas y los sólidos disueltos no son filtrados y por tanto pasan a través de estas membranas.

Las aplicaciones de la MF incluyen el filtrado de sólidos en suspensión, el de materiales floculados y el de bacterias. La diferencia de presión típica entre ambos lados de la membrana (presión transmembrana) es de aproximadamente 1 kg/cm^2 .

Ultrafiltración:

La UF separa las partículas comprendidas en el rango 20 – 1000 Ångstrom. Esto comprende coloides, proteínas, contaminantes microbiológicos y moléculas orgánicas grandes. Mientras que pasarían a través de estas membranas las moléculas más pequeñas y prácticamente todas las sales disueltas.

Tienen un amplio espectro de aplicaciones, entre las que podemos citar: industria de la alimentación, acondicionamiento previo de aguas depuradas para su posterior tratamiento por OI, etc. En UF la presión transmembrana es del orden de 1 a 10 kg/cm^2 .

Nanofiltración:

Con este tipo de membranas son filtradas las partículas con tamaño a partir de 10 Angstroms, que equivalen a 1 nanómetro, de ahí el término de “Nanofiltración”. La NF se aplica a procesos donde sea necesario una filtración comprendida entre OI y UF. Todas las moléculas orgánicas con peso molecular mayor de 200 son rechazadas. Las sales que tienen aniones monovalentes, como los cloruros, presentan rechazos del orden del 20-80%, mientras que las sales con aniones divalentes, como los sulfatos, tienen rechazo superior (90-98%).

Las aplicaciones típicas de la NF son: eliminación en aguas superficiales del color y del carbono orgánico total (TOC), ablandamiento y reducción de los STD de aguas procedentes de pozo, y separación de materia orgánica de la inorgánica en aplicaciones específicas de la alimentación y el tratamiento de aguas residuales. Las presiones transmembrana suelen ser del orden de 3 a 16 kg/cm^2 .

Osmosis inversa:

Comprende a las membranas de mas alto nivel de filtración, de ahí el nombre con el que son también conocidas, membranas de “hiperfiltración”. Las membranas de OI actúan de barrera a la práctica totalidad de las sales disueltas, de las moléculas inorgánicas, así como de las moléculas orgánicas con peso molecular inferior a 200. El rechazo de sales disueltas es del orden del 95 – 99,5%, de ahí que su principal aplicación sea la desalación de aguas salobres o de mar.

Las presiones transmembrana oscilan entre 7 kg/cm² (agua salobre de baja concentración) y 70 kg/cm² (agua salobre de alta concentración y agua de mar).

5.2.- Ecuaciones de transporte.

El fenómeno del transporte a través de membranas de OI puede ser explicado a través de varios modelos, los de mayor aceptación son los dos siguientes:

- El modelo de “absorción preferencial”, desarrollado por Sourirajan **(1)**, según el cual existe un flujo convectivo de agua a través de los poros de la membrana, que se produce en dos etapas:
 - En la primera el agua es absorbida preferencialmente sobre la superficie de la membrana.
 - En la segunda, esta capa con el agua absorbida es drenada a través de los poros en la membrana.

Según este modelo, el tamaño molecular de los solutos presentes en el agua de alimentación juega un importante papel en la determinación de su rechazo por la membrana.

- El modelo de "Solución - Difusión" (el de uso práctico generalmente utilizado), propuesto por Merten **(2)**, según el cual la membrana carece de poros, y por tanto el flujo convectivo no puede existir, en su lugar, el material de la capa activa de la membrana forma una "solución" con el agua, produciéndose el paso de agua y de sales a través de la barrera por "difusión" de estas en aquella "solución", estando controlado el paso, tanto en un caso como en el otro, de acuerdo al grado o coeficiente de difusión del agua y de cada ión componente de la solución de alimentación, en la solución de la membrana.

Según el modelo anterior, el comportamiento de una membrana de OI (m), que viene caracterizado por su propiedad de semipermeabilidad, de acuerdo a Merten, Lonsdale y Riley **(3)**, puede ser expresado mediante las dos ecuaciones básicas de transporte siguientes:

$$Q_{a_m} = K_{a_m}(P_{d_m} - \pi_{d_m})A_m \quad (Ec.1/5)$$

$$Q_{s_m} = K_{s_m} \cdot C_{d_{s_m}} \cdot A_m \quad (Ec.2/5)$$

En las que Q_{a_m} (*Flujo de agua* a través de la membrana m) y Q_{s_m} (*Flujo de la sal s* a través de la membrana m), vienen afectados por un conjunto de variables, representadas en las ecuaciones anteriores por:

K_{a_m} = Coeficiente de permeabilidad al agua, de la membrana m.

K_{s_m} = " " " a la sal s, de la membrana m.

P_{d_m} = Presión diferencial a través de la membrana o diferencia de presiones entre los dos lados de la capa activa de la membrana.

π_{d_m} = Presión osmótica diferencial a través de la membrana o diferencia de las presiones osmóticas correspondientes a las soluciones de ambos lados de la membrana.

C_{ds_m} = Concentración diferencial de la sal s a través de la membrana o diferencia entre las concentraciones de la sales en las soluciones a ambos lados de la membrana.

A_m = Superficie de la membrana.

Los coeficientes de permeabilidad de la membrana m , al agua (K_{a_m}) y al soluto (K_{s_m}), dependen de la temperatura, de los coeficientes de difusión de ambos (agua y soluto) en la "solución" de la membrana, y por tanto del tipo de material de esta, espesor de su capa activa y de la concentración de agua en la misma, así como, y como posteriormente veremos, del nivel de compactación y del grado de ensuciamiento de la membrana.

Al término ($P_{d_m} - \pi_{d_m}$) de la ecuación (Ec.1/5), se le denomina presión neta o efectiva en la membrana.

5.2.1.- Rendimiento de las membranas. Factores que lo afectan.

Un examen de las ecuaciones (Ec.1/5) y Ec.(2/5) nos mostraría que, siendo los coeficientes de permeabilidad característicos de la membrana a emplear en el proceso, y para unas condiciones dadas del agua de alimentación, manteniendo fijo el porcentaje de recuperación o conversión de la membrana, el flujo de agua (Q_{a_m}) a través de ella varía linealmente con la presión neta, mientras que el flujo de sales (Q_{s_m}) no dependería de esta.

Efectivamente, si estableciésemos un gráfico representativo del rendimiento de la membrana, observaríamos que, como el flujo de sales es independiente de la presión, al aumentar esta aquél permanece constante a la vez que se incrementa el flujo de agua, y por tanto como consecuencia de esto existe una mayor dilución de la sal que ha pasado a través de la membrana y se ha incorporado al agua producto, por lo que la concentración en esta habrá disminuido y en consecuencia habrá aumentado el *rechazo de sales* de la membrana (R_{s_m}), y por tanto, disminuido el *paso de sales* (P_{s_m}), tal y como fueron

definidos en el Capítulo 3 (Figura F-III/4) y ecuaciones (Ec.3/3) y (Ec.4/3).

$$(P_{d_m} - \pi_{d_m}) \gg \rightarrow Q_{a_m} \gg \rightarrow (R_{s_m} \gg) \text{ y } (P_{s_m} \ll)$$

Esto está representado en la figura F-V/2, en la que se muestra la evolución típica de los parámetros Q_{a_m} , R_{s_m} y P_{s_m} , con la presión neta o efectiva ($P_{d_m} - \pi_{d_m}$).

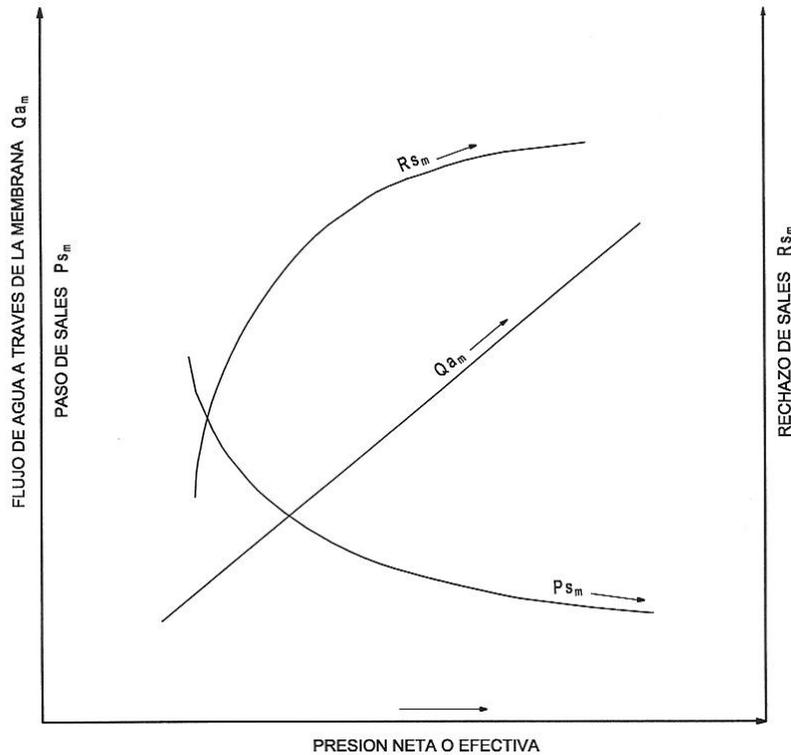


FIGURA F-V/2

Siguiendo el mismo razonamiento anterior, resulta evidente que si la salinidad (concentración) del agua de alimentación a la membrana aumenta, según la (Ec.2/5), el flujo de sales a través de la membrana sube y debido a que la presión osmótica sube con la salinidad, el flujo de agua a través de la membrana decrece y aumenta por tanto el paso de sales.

Finalmente, otro de los factores que incide sobre el rendimiento de la membrana y que resulta conveniente citar es el porcentaje de recuperación o factor de conversión de la membrana (R_m).

Para unas condiciones de operación dadas, un aumento en el valor del porcentaje de recuperación, disminuyendo el flujo de agua de rechazo, trae consigo una disminución del flujo de agua a través de la membrana y un empeoramiento de la calidad del producto, ya que como consecuencia de la reducción en el porcentaje de agua de rechazo, aumenta la concentración de sales en la corriente alimentación-rechazo y con esta la presión osmótica, disminuyendo por tanto Q_{a_m} .

$$R_m \gg \rightarrow Q_{a_m} \ll \rightarrow (R_{s_m} \ll) \text{ y } (P_{s_m} \gg)$$

Los efectos anteriores son más significativos para altas recuperaciones y/o altas concentraciones en el agua de alimentación.

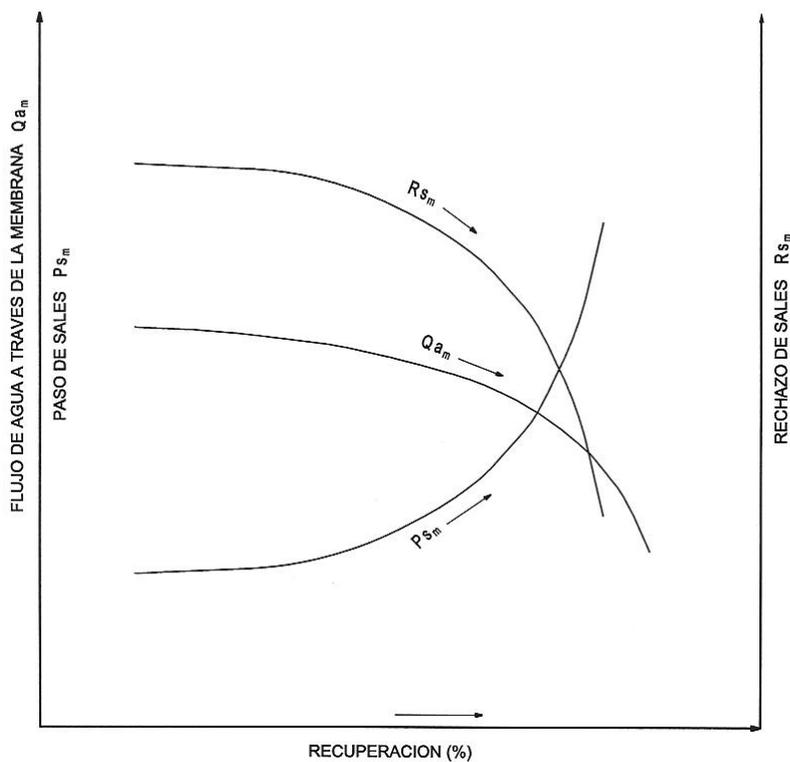


FIGURA F-V/3

Existen otros factores que afectan al rendimiento de una membrana, como es la posible degradación del material de la membrana con el tiempo de operación, el ensuciamiento, etc. Así p.e. la degradación química (hidrólisis) influye principalmente en el

rechazo de sales, y por tanto afectará a la (Ec.5) , mientras que la degradación mecánica (compactación) lo hace sobre el flujo de agua y afecta a la (Ec.1/5).

Las ecuaciones básicas junto a la evolución de las curvas de rendimiento con el tiempo y condiciones de operación, describen el comportamiento de una determinada membrana, para esas determinadas condiciones de servicio.

5.3.- Polarización de la concentración.

5.3.1.- Concepto de polarización de la concentración.

Durante el proceso de OI, el flujo de la corriente de alimentación se divide en dos sobre la superficie de la membrana, uno en dirección normal (Flujo de permeado) y otro en dirección paralela a esta o perpendicular al anterior (Flujo de concentrado), continuación del flujo de alimentación, y que como consecuencia de la permeación a través de la membrana, a medida que se reduce su caudal de paso, la concentración de sales en él aumenta.

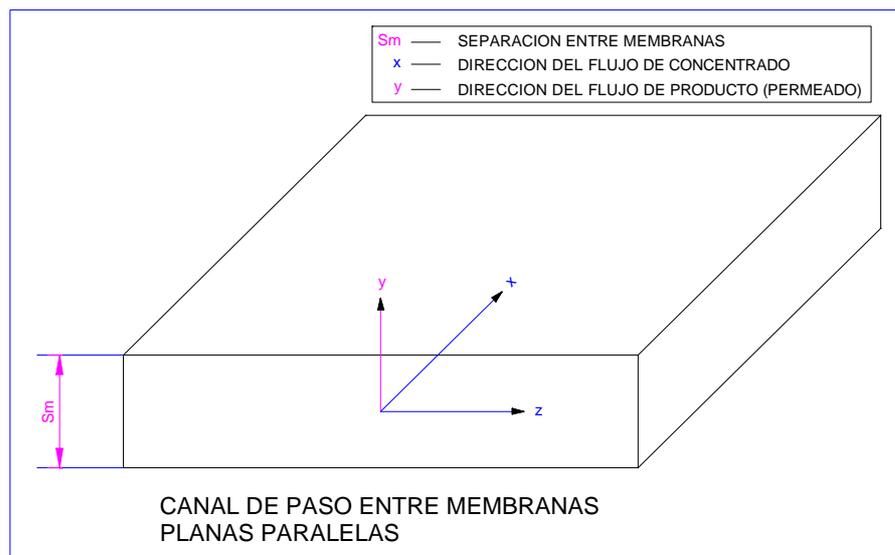


FIGURA F-V/4

Los resultados finales de ambos flujos a la salida del sistema de OI, en una planta de desalación, son respectivamente el flujo de agua producto o "producción" de la planta y el flujo de agua de rechazo o "rechazo" de la misma.

El flujo de permeado "concentra" las sales sobre la superficie de la membrana, mientras que el de concentrado las "difunde".

Como ocurre en las conducciones hidráulicas, debido a la distribución de velocidades de las partículas del líquido en la sección de paso del mismo, el fluido adyacente a la pared del tubo, se mueve con relativa lentitud, con respecto al grueso de la corriente central del tubo, dando lugar a la denominada capa limite, delgada película adyacente a la pared y en la cual la velocidad del fluido es prácticamente nula, por lo que en el interior de ella, al no ser completamente arrastradas las sales por la corriente, se provocará un aumento de su concentración, que podrá dar lugar incluso a posterior precipitación de aquellas menos solubles (carbonato y sulfato cálcico, sílice, etc.), que con el tiempo se adhieren a la superficie del tubo, produciendo una disminución de la sección de paso efectiva y en consecuencia un incremento de la inicial pérdida de energía por rozamiento (pérdida de carga), a lo largo del tubo.

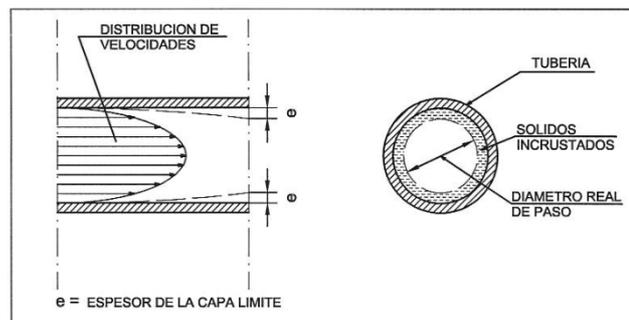


FIGURA F-V/5

En el proceso de OI, el fenómeno anterior es más acusado todavía, debido a que las sales dejadas atrás por el agua durante la permeación y que quedan sobre la superficie de la membrana, producen un incremento adicional de la "sobreconcentración" en la capa límite creada sobre la superficie de la membrana, aún cuando el flujo de concentrado se produzca en condiciones de alta turbulencia. Este aumento de la

concentración sobre la superficie de la membrana, provocado por ambos efectos simultáneamente, permeación y rozamiento, se conoce con el nombre de "polarización de la concentración" (PC), y se define por la relación entre la concentración de sales sobre la superficie de la membrana y la concentración media de sales en el grueso de la corriente de concentrado (Capítulo III) (Figura F-V/6).

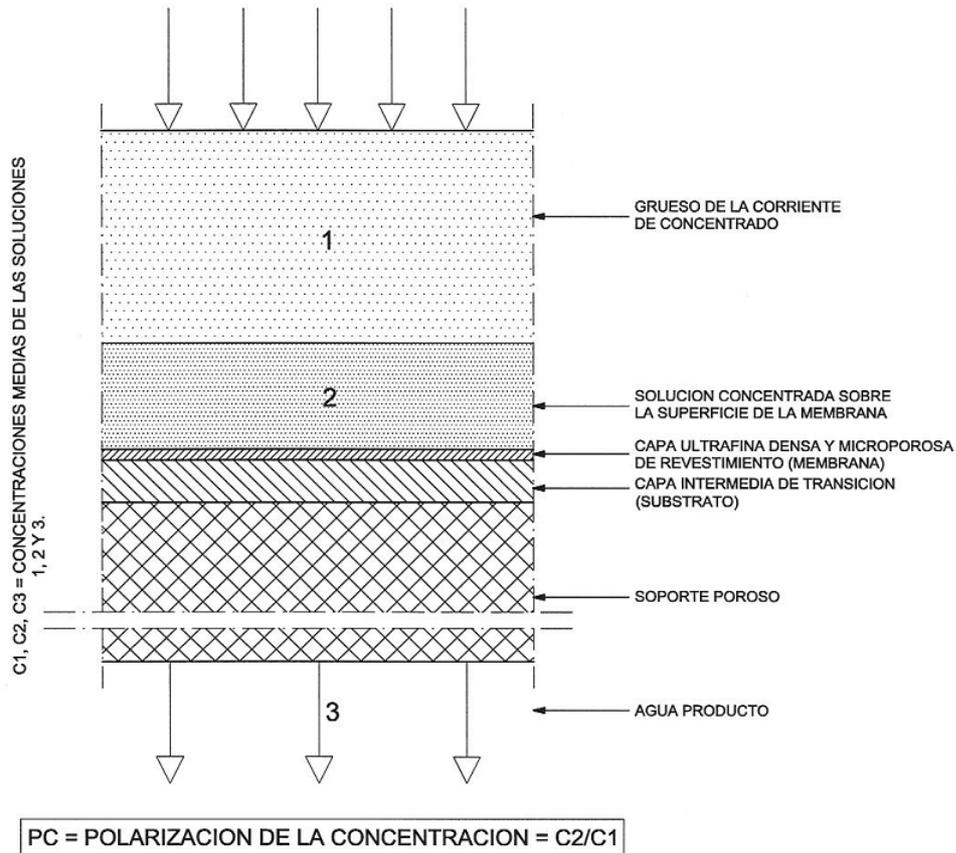


FIGURA F-V/6

En plantas de desalación de aguas salobres, la polarización de la concentración, como veremos en posteriores apartados, puede provocar incrementos de concentración sobre la superficie de la membrana, del orden de 1,05 a 1,5 veces el valor de esta en la corriente de concentrado.

5.3.2.- Efectos en el proceso de desalación por OI.

Hay tres efectos negativos asociados con la polarización de la concentración y que inciden sobre el rendimiento del sistema de OI y por tanto sobre el rendimiento de la planta de desalación. Estos efectos, provocados por el incremento de la concentración de soluto sobre la superficie de la membrana, fundamentalmente son:

a) Debido al comportamiento no ideal de la membrana, esta subida en la concentración de sales produce un incremento del paso de sales a través de la membrana y por tanto una mayor difusión de soluto en la corriente de permeado, aumentando este su concentración (Empeoramiento de la calidad del agua producto).

b) Posibilidad de alcanzar la saturación, sobre la superficie de la membrana, de alguno (s) de los componentes de la solución. Lo que podría inducir a precipitaciones de estos que provocarían ensuciamiento de la membrana con sus consecuencias correspondientes (Capítulo III), reducción física de las secciones de paso de ambos flujos (concentrado y permeado), mayor caída de presión a lo largo de la superficie de la membrana, descenso del flujo de permeado, incrementos de la presión de operación y de la propia polarización de la concentración, etc.

c) Aumento de la presión osmótica efectiva, lo que provocaría una disminución del flujo de permeado.

Un análisis más detallado de los anteriores efectos, se indica en posteriores apartados de este mismo Capítulo.

5.3.3.- Soluciones prácticas.

Para contrarrestar los efectos de la polarización de la concentración, existen 5 formas prácticas de actuación:

1ª) Diseñar el módulo de OI de forma que aumente la turbulencia de la corriente de concentrado en él, para favorecer la difusión de sales en la misma. Este es el caso de los módulos de arrollamiento en espiral, los cuales utilizan el espaciador de concentrado como promotor de turbulencia.

2ª) No operar con excesivas recuperaciones, ya que al aumentar esta se incrementa el factor de concentración, el flujo de permeado con respecto al de concentrado sube y se favorece el incremento de sales sobre la superficie de la membrana y por tanto el valor de la polarización de la concentración.

3ª) Disponer adecuadamente los módulos de OI, en el conjunto del sistema, en función del nivel de recuperación deseado. Con objeto de lograr altos flujos de concentrado, que permitan mantener valores de PC tolerables, en todos y cada uno de ellos. Para altas recuperaciones con arreglos tipo "Christmas Tree" (Capítulo III, figuras F-III/14 y F-III/15), se consigue mantener altas velocidades axiales en todos los módulos del sistema, al mismo tiempo que se reduce el valor de PC en el módulo más desfavorable, esto es, en aquél que opera con el más alto nivel de concentración de sales (módulo final del sistema).

4ª) Aportación de flujos auxiliares, como recirculación de concentrados desde ciertas zonas favorecidas del sistema, a otras cuya operación normal es más desfavorable.

5ª) Empleo de lavados turbulentos y periódicos, para "romper" la capa límite y arrastrar las sustancias "liberadas".

En cualquier caso, debe tenerse presente que aún con altas turbulencias, existe un gradiente de concentración en la capa límite establecida sobre la superficie de la membrana, por lo que debe cuidarse que la concentración de sales, en dicha capa límite, permanezca siempre por debajo de un valor inferior al límite de solubilidad de aquellas sales susceptibles de precipitación, al objeto de eliminar cualquier posibilidad de incrustación de estas sobre la superficie de la membrana.

5.3.4.- Análisis teórico del fenómeno.

El fenómeno de la polarización de la concentración, descrito en los apartados anteriores, permite un análisis gráfico a partir de la figura F-V/7, donde se muestra, de una forma esquemática, el mecanismo de formación de la capa límite en el proceso de OI.

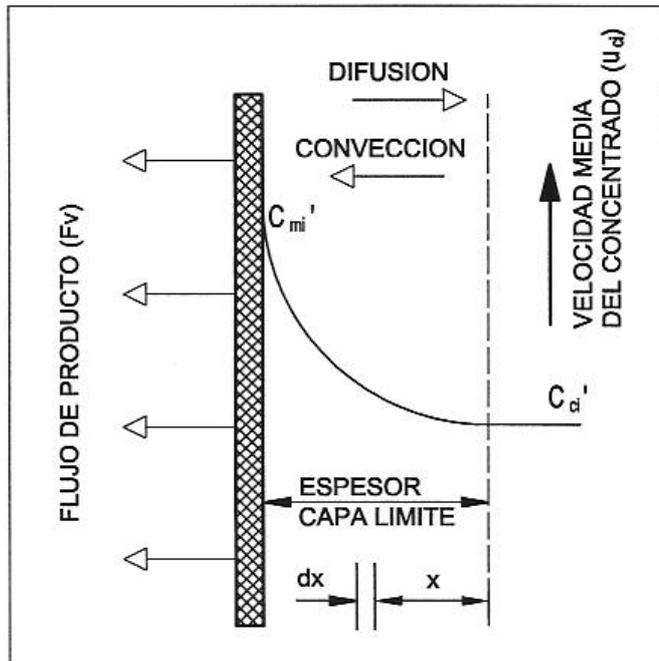


FIGURA F-V/7

El análisis riguroso y detallado de este fenómeno resulta complejo, ya que en la OI al producirse el flujo de disolvente a través de la membrana, arrastra solutos con él hacia la superficie de esta, donde son prácticamente rechazados. Estos solutos tienden a difundirse dentro del grueso de la corriente de alimentación, la cual se irá concentrando paulatinamente cada vez más en la medida que va aumentando la permeación, y continúen difundándose en aquella las sales rechazadas.

De forma que si c_i' es la concentración de soluto en la solución de alimentación inicial y F_v es el flujo volumétrico a través de la membrana, este llevará con él hacia la superficie de la membrana, por *convección*, una cantidad de soluto igual a $F_v \cdot c_i'$.

Considerando un comportamiento ideal de la membrana (Todas las sales son rechazadas en un 100%, o lo que es lo mismo el paso de sales a través de la membrana es nulo), el soluto es retenido sobre la superficie de la membrana, parte de él se vuelve a difundir en el resto de la corriente de alimentación, aumentando esta su concentración, y el resto de soluto permanece sobre la superficie de la membrana. La concentración de soluto sobre la membrana, se irá pues paulatinamente incrementando. El equilibrio se producirá cuando se alcance un estado estable, en el que la cantidad de solución transportada hacia la membrana por convección, se ha balanceado justamente con el flujo difusivo a partir de esta:

$$Fv \cdot c_i' - D_i'(dc_i'/dx) = 0 \quad (Ec.3/5)$$

En la que D_i' es el coeficiente de difusión del soluto en la solución de alimentación, y x indica la dirección normal a la superficie de la membrana. Así para:

$$\begin{aligned} x = 0 &\rightarrow c_i' = C_{ci}' \\ x = \delta &\rightarrow c_i' = C_{mi}' \end{aligned}$$

Siendo δ el espesor de la capa límite y C_{ci}' , C_{mi}' , las concentraciones de soluto en el grueso de la solución de concentrado y en la solución adyacente a la superficie de la membrana.

La integración de la (Ec.3/5), da como resultado **(4)**:

$$\ln(C_{mi}'/C_{ci}') = (Fv \cdot \delta / D_i')$$

Ecuación que puede escribirse en la forma más útil de aplicación:

$$e^{(Fv \cdot \delta / D_i')} = C_{mi}'/C_{ci}' = PC_i \quad (Ec.4/5)$$

El valor de δ (espesor de la capa límite) varía en relación inversa con la velocidad media del grueso de la corriente de concentrado, paralela a la superficie de la membrana

(u_{ci}). Por lo que, a partir de la (Ec.4/5), se deduce que:

$$PC_i = \text{Polarización de la concentración} = f(F_v / (u_{ci} \cdot D_i')) \quad (\text{Ec.5/5})$$

En consecuencia:

* F_v » (Aumento del flujo de permeado) $\rightarrow PC_i$ »

* u_{ci} » (Incremento de la velocidad axial) $\rightarrow PC_i$ «

* D_i' « (Solutos de alto peso molecular) $\rightarrow PC_i$ »

La complejidad en la determinación analítica de δ y D_i' , que varían no solo de una configuración modular a otra, sino además con el régimen de circulación del fluido, canales de concentrado y tipos de solutos presentes en el agua de alimentación. Ha conducido al análisis práctico del fenómeno, a través de determinaciones experimentales, a partir de sus efectos, para cada caso concreto.

Así, determinaciones experimentales de los tres efectos negativos asociados con la polarización de la concentración, indicados en el apartado 5.3.2, han sido realizadas por varios autores, para diversos tipos de configuraciones y para distintas condiciones de operación, como p.e. para módulos tubulares por J. W. MCCUTCHAN (5).

L. DRESNER Y J. S. JOHNSON (6) han expuesto tests experimentales realizados por varios autores para otras configuraciones.

Para ilustrar gráficamente estos efectos, se han tomado los resultados expuestos por M. C. PORTER (7). De esta forma:

- A) El efecto de la PC sobre el rechazo de sales, puede apreciarse en el gráfico de la figura F-V/8, en el que se muestra el efecto de la velocidad del concentrado, y por tanto de PC, sobre el rechazo de ión cloruro, para una solución de alimentación de

cloruro sódico en agua. A medida que sube la velocidad (disminuye el valor de PC según la (Ec.5/5)), sube el rechazo.

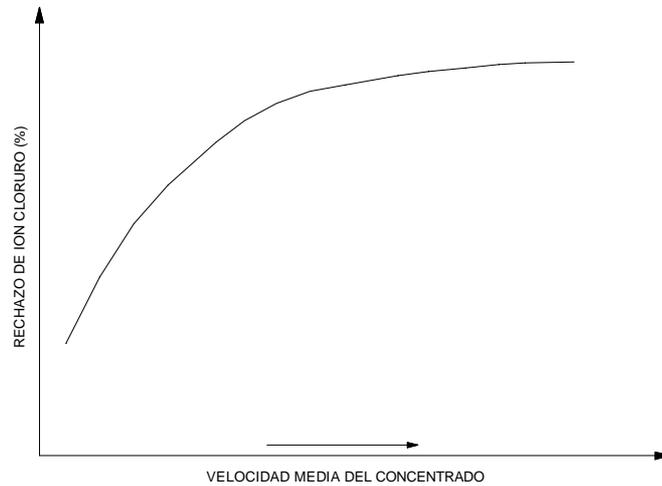


FIGURA F-V/8

B) El efecto de la PC sobre el flujo de permeado. Como se indicó en 5.3.2, la subida en el valor de PC, da como resultado un incremento de la presión osmótica efectiva y por tanto se reducirá el flujo de disolvente a través de la membrana. Esto puede observarse en figura F-V/9, donde se muestra el efecto del flujo de alimentación sobre el flujo de permeado de la membrana. Para altas velocidades, decrece el valor de PC, decreciendo la presión osmótica efectiva y sube el flujo de permeado.

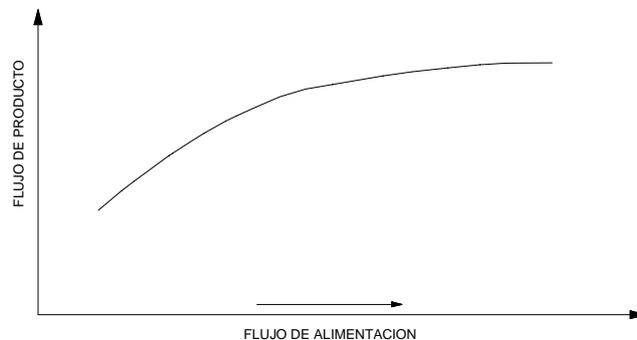


FIGURA F-V/9

C) Finalmente, en la figura F-V/10, se muestran los resultados de los dos efectos anteriores simultáneamente, al incrementar el nivel de recuperación. Con este incremento descenderá la velocidad del concentrado (aumentará PC), dando como resultado una subida en el paso de sales y un descenso en el flujo de agua producto.

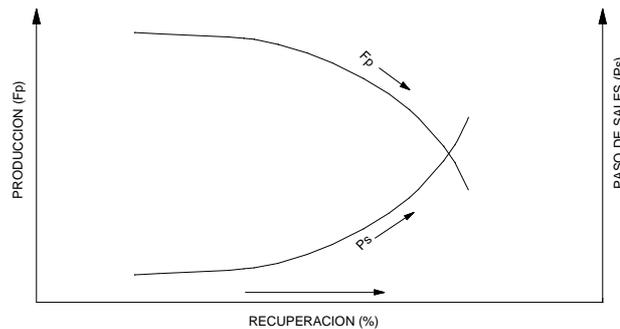


FIGURA F-V/10

Estos efectos, como ya se ha indicado, además pueden verse reforzados con la posibilidad de precipitación de sales poco solubles, en el caso de presencia de estas en el agua de alimentación, en cuyo caso el ensuciamiento afectará al flujo de permeado e incluso al rechazo de sales, dependiendo de las propiedades de las sustancias ensuciantes. Si el agente ensuciante forma una capa de ensuciamiento porosa, entonces el incremento del valor de PC sobre dicha capa, reduce significativamente el rechazo de sales. En el caso de que las sustancias ensuciantes formen una película fina pero impermeable, el nivel de flujo de permeado descenderá, pero podrá no hacerlo el rechazo de sales, que incluso al descender el permeado podría incrementarse.

5.3.5.- Aplicación al caso de módulos de arrollamiento en espiral.

Las ecuaciones (Ec.4/5) y (Ec.5/5), pueden particularizarse para cada caso concreto de configuración modular.

En el caso de módulos de arrollamiento en espiral, la GULF ENVIRONMENTAL SYSTEMS CO. (8), propone la siguiente expresión:

$$PC_j = C_{mj} / C_{cj} = e^{Kp_j(Fp_j/Fc_j)} \quad (Ec.6/5)$$

En la que:

PC_j = Polarización de la concentración en el módulo j.

C_{mj} = Concentración de soluto sobre la superficie de la membrana del módulo j.

C_{cj} = Concentración de soluto en el grueso de la corriente de concentrado del módulo j.

Fp_j = Flujo de agua producto del módulo j.

Fc_j = Flujo medio de concentrado en el módulo j.

Kp_j = Coeficiente de polarización del módulo j. Inversamente proporcional al coeficiente de difusión del soluto y a la longitud del canal de salmuera (Longitud del módulo L).

Se han realizado experiencias, determinándose valores de la polarización de la concentración en módulos estándar de 40" de longitud, longitud típica de los normalmente utilizados en plantas de desalación.

En la figura F-V/11 se muestran los valores de PC en módulos de estas características y en función de la relación entre el flujo de agua producto del módulo y el flujo medio de concentrado en el mismo, para dos tipos de soluciones de alimentación, cloruro sódico y sulfato magnésico.

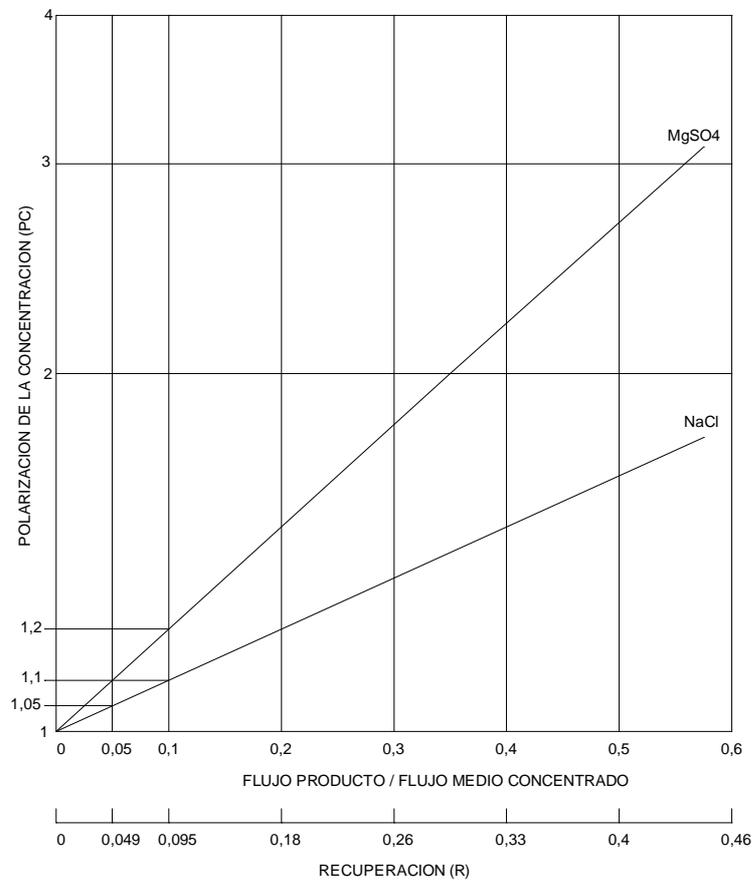


FIGURA F-V/11

Teniendo en cuenta que el rango de recuperaciones por módulo de 40", para desalación de aguas, es de 0-18%. Y según se aprecia en el gráfico anterior, para ese rango de recuperaciones, $F_{p_j}/F_{c_j} \approx R_j$ (Recuperación en el módulo j, en tanto por uno), la (Ec.6/5), para el caso de soluciones de cloruro sódico en agua, puede escribirse en la siguiente forma práctica simplificada:

$$PC_j = e^{0,99(F_{p_j}/F_{c_j})} \approx e^{R_j} \quad (Ec.7/5)$$

Y para el caso de soluciones de sulfato de magnesio en agua, y también dentro del intervalo de recuperaciones indicado:

$$PC_j = e^{1,98(F_{pj}/F_{cj})} \approx e^{2R_j} \quad (Ec.8/5)$$

Así para una recuperación en el módulo del 10%, la PC sería de 1,1 para la solución de cloruro sódico, y de 1,22 para la solución de sulfato de magnesio.

Con el avance experimentado en los últimos años en el diseño de los módulos de arrollamiento en espiral con membranas compuestas de película fina (TFC), con capa activa extremadamente delgada y mallas espaciadoras del concentrado más finas. Se ha logrado, además de disponer de más área activa por módulo, mejorar el régimen de turbulencia en el canal de concentrado, lográndose coeficientes de polarización para módulos de 40", y soluciones de NaCl, del orden de 0,68 - 0,7. Así la ecuación propuesta en el *Filmtec Technical Bulletin (9)* es:

$$PC_j = e^{0,7R_j} \quad (Ec.9/5)$$

Ahora bien, dado que en casi todas las aguas susceptibles de desalación, la sal predominante es NaCl, pero no la única, y como el más común y serio problema resultante de la polarización de la concentración, es el del incremento de la tendencia a la precipitación de las sales poco solubles y la deposición de partículas sobre la superficie de la membrana.

Considerando que el comportamiento del sulfato cálcico en soluciones de cloruro sódico, es similar al del MgSO₄, en condiciones de flujo turbulento **(10)**. La concentración de sulfato cálcico sobre la superficie de la membrana es aproximadamente un 22% más concentrada que en el grueso de la corriente de concentrado, para módulos de arrollamiento en espiral, con un 10% de recuperación.

Asumiendo que el sistema de OI, opera con un 10% de recuperación en su módulo final (más "concentrado"), según lo anterior se deduciría que el nivel de concentración de CaSO₄, en la corriente de concentrado de este módulo, que produciría la concentración de saturación sobre la superficie de la membrana, sería de aproximadamente $1/1,22 \approx 0,8$. Esto es un 80% de la concentración de saturación (Capítulo III, apartados 3.4.5, 3.4.6

y 3.4.7).

Para minimizar los efectos de la PC sobre la cantidad y calidad de agua producida, y en definitiva sobre el rendimiento de una planta de desalación de aguas salobres por OI, debe procurarse que en cualquier módulo del sistema, la relación entre el flujo de rechazo del mismo y el flujo de permeado en él, esté comprendido en el rango de 5:1 a 10:1 ($R < 17\%$), ya que en estos casos, los efectos son relativamente pequeños y tolerables. Lo anterior equivale a la operación de un contenedor de presión con 6 elementos de 40" en serie, con un rango de recuperación aproximado del 35-55%.

Estos efectos, pequeños y tolerables, requieren un mínimo régimen de turbulencia en los módulos, en función del tipo de agua de alimentación y de su capacidad ensuciante (Capítulo III). De forma que además del control de la recuperación en los módulos, se requiera un mínimo flujo de rechazo del 6º elemento, es decir del último de la serie dispuesta en el contenedor (flujo de rechazo del contenedor), cuya corriente de concentrado, que posee la máxima concentración, sea suficiente para mantener una mínima velocidad (Número de Reynolds) en el canal de concentrado.

Así para los módulos de 4" de diámetro nominal, el flujo mínimo de rechazo es de aproximadamente $1 \text{ m}^3/\text{h}$, y para los de 8", $4 \text{ m}^3/\text{h}$ (apartado 5.5.1).

Los límites en los valores de la recuperación (máximo) y del flujo de rechazo (mínimo), limitan consecuentemente los flujos de alimentación (mínimo) y de permeado (máximo), para cada caso concreto.

Es conveniente tener presente que, aún cuando el incremento del régimen de turbulencia, por incremento del flujo de alimentación al módulo de OI, reduce el efecto de la polarización de la concentración en el. Simultáneamente, este hecho produce, por un lado, una pérdida de energía adicional por fricción, incrementándose los requerimientos energéticos de bombeo, y por otro, la excesiva velocidad de flujo puede provocar daños en la estructura física del módulo. De ahí que ambos efectos deben considerarse simultáneamente, en el diseño del sistema de OI.

Estos últimos aspectos se analizan con más detalle en los apartados siguientes.

5.4.- Influencias de la temperatura, compactación y ensuciamiento.

En el apartado 5.2 de este Capítulo, se indicó que los coeficientes de permeabilidad de la membrana m , al agua (K_{a_m}) y al soluto (K_{s_m}), dependen de la temperatura, de los coeficientes de difusión de ambos (agua y soluto) en la "solución" de la membrana, y por tanto del tipo de material de esta, espesor de su capa activa y de la concentración de agua en la misma, así como, del nivel de compactación y del grado de ensuciamiento de la membrana.

El grado de influencia de estos tres parámetros, temperatura, compactación y ensuciamiento, depende a su vez del tipo de membrana, componentes, proceso de fabricación, etc.

En la medida en la que K_{a_m} y K_{s_m} aumentan con la temperatura y disminuyen con esta, de la misma forma lo hacen por tanto el flujo de agua producto y el flujo de sales a través de la membrana (*Ec.1/5*) y (*Ec.2/5*). El efecto anterior sobre el rendimiento de una planta de desalación de aguas por OI puede apreciarse en las figuras adjuntas.

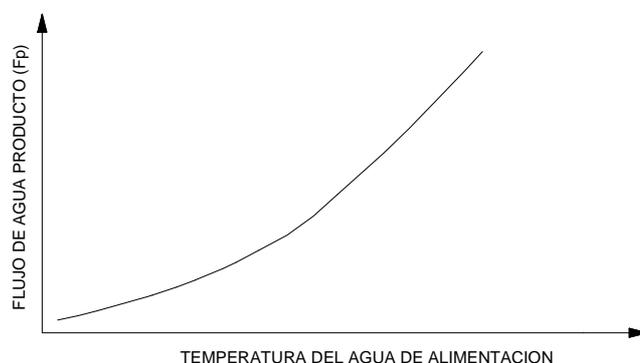


FIGURA F-V/12

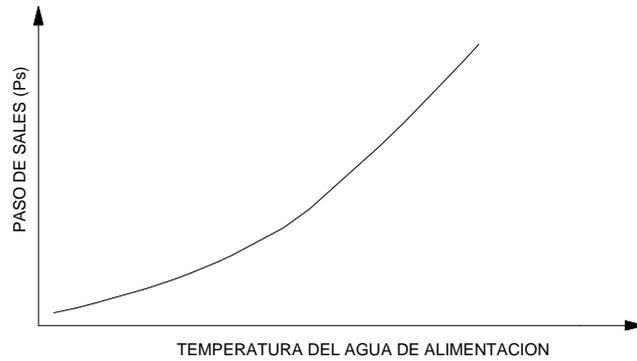


FIGURA F-V/13

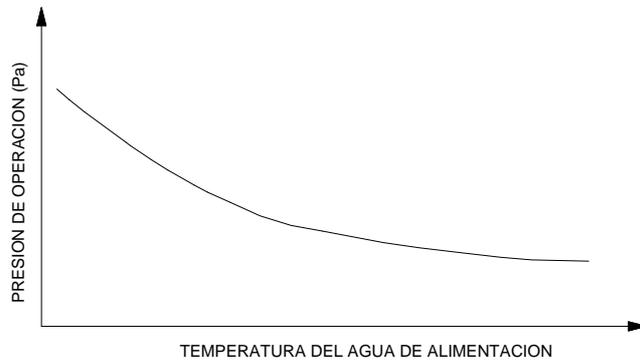


FIGURA F-V/14

En las que se observa como al aumentar el flujo de agua producto con la temperatura, la presión de operación de la planta (presión de alimentación), manteniendo fijas las otras variables de operación, como son la concentración del agua de alimentación, la capacidad de producción y la conversión, disminuye, y por tanto, lo hace con esta el consumo de energía. Empeorando la calidad del agua producto.

Teniendo en cuenta que las condiciones estándar de operación aportadas por los distintos fabricantes de membranas están referidas a la temperatura de 25°C (77°F), se considera el efecto de la temperatura sobre el flujo de agua producto y sobre la calidad del mismo, por medio un coeficiente o factor de corrección por temperatura FT, equivalente al término anglosajón TCF (Temperature Correction Factor), sobre los valores estándar de referencia.

$$FT(TCF) = F_{pT}/F_{p25} \approx P_{sT}/P_{s25} \quad (Ec.10/5)$$

Así los fabricantes de los distintos tipos de membranas aportan en sus manuales técnicos, cuadros o tablas con los valores de TCF para distintas temperaturas, obtenidos experimentalmente.

Desde el punto de vista de diseño de plantas, resulta más cómodo el uso de las ecuaciones de aproximación propuestas por los propios fabricantes.

A continuación se indican, como referencia las propuestas por Fluid Systems y por Filmtec Corporation para sus membranas de PA de arrollamiento en espiral, TFC y FT-30 respectivamente:

a) Fluid Systems.

$$FT(TCF) = e^{3470((1/298 - 1/(273+T)))} \quad (Ec.11/5)$$

siendo T la temperatura en °C.

b) Filmtec Co.

$$FT(TCF) = e^{2640((1/298 - 1/(273+T)))} \quad \text{Para } T > 25 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (Ec.12a/5)$$

$$FT(TCF) = e^{3480((1/298 - 1/(273+T)))} \quad \text{Para } T < 25 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (Ec.12b/5)$$

En membranas nuevas, los periodos de parada dan como resultado una más alta productividad de las mismas al entrar en presurización. De forma que una rápida presurización puede dar como resultado, una momentánea oleada de productividad. Por lo que, en estos casos es recomendable una presurización escalonada del sistema. Este efecto es bastante apreciable cuando el sistema de OI está cargado con elementos nuevos. Esto es debido a la elasticidad de las capas que constituyen la membrana.

Con el tiempo de operación, el efecto anterior se vuelve menos apreciable, debido a que las fibras del material constituyente de la membrana al estar sometidas a la presión de alimentación, pierden elasticidad y se vuelven más rígidas.

Los esfuerzos de compresión sobre el sustrato poroso de la membrana provocan una densificación de la estructura interna de los poros y como consecuencia un estrechamiento de los mismos, irreversible por la pérdida de elasticidad.

Esta degradación mecánica (compactación), como se indicó en el apartado 5.2 de este Capítulo, unida al ensuciamiento, hace que la presión de alimentación necesaria para mantener, durante el tiempo de operación, una producción constante, se incremente paulatinamente, o lo que es lo mismo, manteniendo constante la presión inicial de operación de la planta, se produce un descenso paulatino en el flujo de agua producto.

Estos fenómenos, compactación y ensuciamiento, cuyos efectos se muestran en la figura *F-III/18*, del Capítulo 3, tienen pues influencia sobre la *(Ec.1/5)* y habrán de tenerse en cuenta en el diseño de la planta.

La representación gráfica de los valores logarítmicos de producción y tiempo de operación, resulta más útil que la figura anterior, ya que se obtendría una línea aproximadamente recta y de pendiente negativa. Esta inclinación del gráfico resultante es una medida empírica de la estabilidad de la membrana a lo largo del tiempo de operación de la misma.

Con objeto de simplificación se considera un nuevo factor para corrección del flujo de permeado con el tiempo de operación, y dado que dicho factor engloba los efectos de los dos fenómenos anteriormente citados (ensuciamiento y compactación), lo denominaremos factor de corrección por tiempo de operación (*Ft*).

Como puede deducirse del gráfico de la figura *F-VII/8*, apartado 7.3 del Capítulo 7 de este trabajo de tesis. A efectos de diseño de plantas de desalación de aguas salobres, empleando membranas de PA de arrollamiento en espiral, similares a las utilizadas en

nuestro caso concreto, resulta aceptable adoptar los siguientes valores de Ft:

TIEMPO DE OPERACION	Ft
1 año	0,9
3 años	0,8
5 años	0,7

Suficientemente conservativos comparados con los recomendados por los fabricantes de este tipo de membranas.

5.5.- Diseño del sistema de OI.

5.5.1.- Guías de diseño.

Resulta evidente que solo la experiencia puede poner límite al flujo de permeado y al nivel de recuperación de un elemento de OI (membrana), para distintos tipos de agua a tratar. Pues aun no superando la concentración máxima de solubilidad de las distintas sales presentes en el agua sobre la superficie de la membrana. La concentración de materia ensuciante podría provocar un alto nivel de “tajonamiento” de la membrana. Como ya se ha visto (Capítulo 3), el *índice de atascamiento de la misma*, conocido por SDI (Silt Density Index), es un buen indicador de la cantidad de materia ensuciante presente en el agua. Sería por tanto, una ventaja, a la hora de proceder al diseño de un sistema de OI, conocer el rendimiento de otro sistema que haya estado operando con el mismo tipo de agua. Sin embargo, frecuentemente no se dispone de otro sistema en estas circunstancias.

La imposibilidad de realizar esta comparación hace que en la práctica se recurra a las recomendaciones proporcionadas en las guías de diseño por los fabricantes de membranas.

De esta forma, de la guía de diseño propuesta en el *Filmtec Technical Manual* (11) para sus membranas de PA de arrollamiento en espiral, establecemos el cuadro adjunto para elementos de OI de 40" de longitud, y 4" y 8" de diámetro, normalmente utilizados para desalación de aguas salobres a nivel industrial, en función del SDI de estas.

TABLA T-V/1

CONCEPTO	ELEMENTO DE OI	SDI<1	1<SDI<3	3<SDI<5
RECUPERACIÓN MAXIMA (%)	4" X 40"	30	19	15
	8" X 40"	30	19	15
FLUJO ALIMENTACIÓN MAXIMO (m ³ /h)	4" X 40"	4,1	4,1	4,1
	8" X 40"	16	14	12
FLUJO PRODUCTO MAXIMO (m ³ /d/m ²) (*)	4" X 40"	1,277	1,046	0,862
	8" X 40"	1,065	0,903	0,71
FLUJO CONCENTRADO MINIMO (m ³ /h)	4" X 40"	0,5	0,9	0,9
	8" X 40"	1,8	3,6	3,6

(*): El flujo máximo de agua producto se expresa en m³/día por unidad de superficie de membrana.

En cuanto a la superficie activa de membrana por módulo o elemento de OI de 40" de longitud comercializados por Filmtec, para aplicaciones específicas de desalación de aguas salobres (Brackish Water, BW), esta oscila entre 330 y 440 ft² (31-41 m²) para los de 8" de diámetro nominal, y entre 70 y 78 ft² (6,50-7,25 m²) para los de 4".

Similares elementos de OI y guías de diseño aportan otros fabricantes de membranas de PA de arrollamiento en espiral (4"X40" y 8"X80"), tales como Fluid Systems, Hydranautics, Toray, Desalination Systems.

Si bien la aportación práctica a este trabajo de tesis se ha basado en una planta equipada con membranas de Filmtec. En los apartados que siguen se ha pretendido que el diseño pueda ser intercambiable a otros modelos de membranas de PA, de arrollamiento en espiral.

5.5.2.- Tipos de sistemas de OI a considerar.

De los dos tipos de procesos de OI a considerar inicialmente, sin y con reciclado del concentrado o rechazo hacia la alimentación, es el primero de ellos el más usual para operaciones continuas, ya que el segundo, entre otras razones, impide un flujo de permeado continuo, una calidad en el producto constante y además requeriría un depósito de alimentación de un gran volumen para poder homogeneizar la mezcla concentrado-alimentación, motivos por los que su uso está restringido a ciertas aplicaciones discontinuas de pequeños volúmenes de agua a tratar.

Por lo que la mayoría de los sistemas de OI contemplan un proceso de operación continua sin reciclado del concentrado, con objeto de conseguir que tanto el flujo de agua producto, como la calidad del producto y el nivel de conversión sean aproximadamente constantes. Las pequeñas variaciones posibles en las condiciones del agua de alimentación, como pueden ser su contenido en sales, su temperatura y/o su potencial de ensuciamiento, se compensarían ajustando mínimamente los parámetros de operación del sistema, fundamentalmente la presión de alimentación a la que ha de operar el sistema, lo que habrá de ser tomado previamente en cuenta en el diseño del equipo de bombeo.

Por todo lo anterior consideraremos solo procesos sin reciclado del concentrado.

Como se vio en el Capítulo III, apartado 3.2, un sistema de OI con módulos de arrollamiento en espiral, consiste en un cierto número de contenedores de presión, también llamados tubos de presión, que contienen en su interior un cierto número de cartuchos o elementos de OI (de 1 a 7 por módulo o tubo). El conjunto formado por un tubo de presión con sus correspondientes elementos, recibe el nombre de módulo de OI. A su vez, un sistema de OI puede estar formado por un solo módulo o por varios que podrán colocarse según 3 disposiciones básicas, en serie, paralelo o mixta.

A continuación pasamos a analizar con más detalle los tipos de sistemas de OI a considerar.

. Sistemas de OI de un solo módulo (unimodulares).

Este sería el caso de la figura III/12-3 del Capítulo III, el número de elementos colocados (conectados) en serie en el módulo, como ya se indicó, puede variar de 1 a 7. El concentrado del primero de ellos, el que recibe todo el caudal de alimentación procedente del equipo de bombeo, constituye la alimentación del segundo, y así sucesivamente. Las salidas de los permeados de todos los elementos están conectadas entre si y conectados a su vez a la salida de producto del módulo. El concentrado final (concentrado del último cartucho de la serie), está conectado a la salida de rechazo del módulo.

La aplicación de este tipo de sistema de OI se limita a los casos de producciones y conversiones bajas, en los que solo es necesaria una etapa de desalación y unas pocas membranas para conseguir alcanzar estos niveles. Generalmente se adoptan para lograr un factor de conversión o recuperación como máximo de hasta un 55%. En la figura adjunta se muestran dos ejemplos típicos de aplicación en desalación de aguas salobres, empleando 6 membranas de 4"X40" y 6 de 8"X40", con recuperación final del 50%.

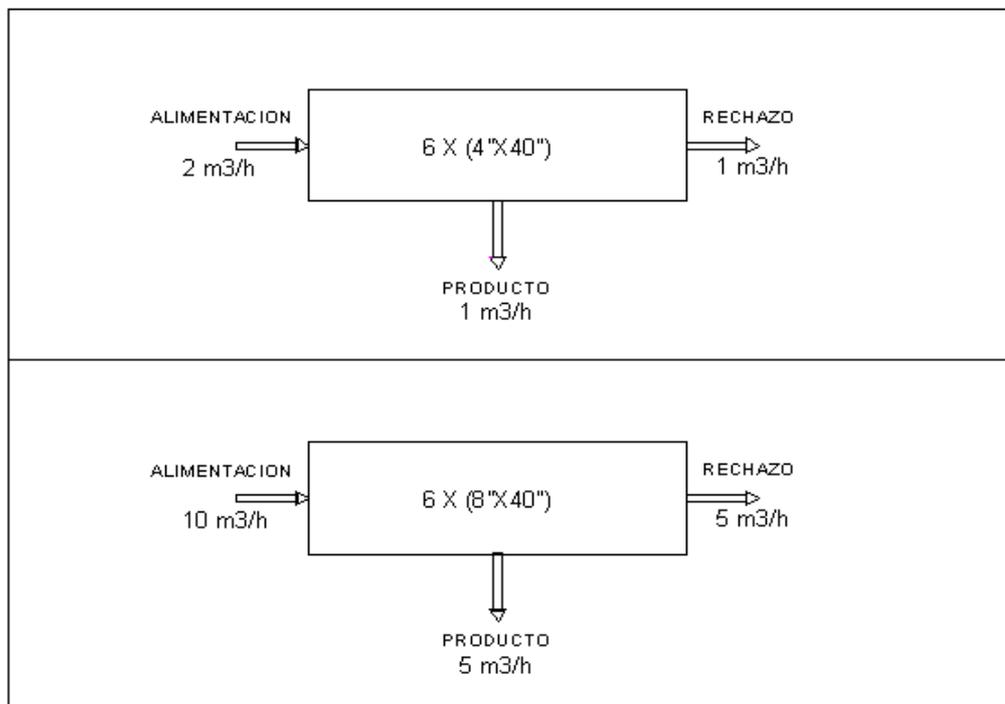


FIGURA F-V/15

. Sistemas de OI de varios módulos (multimodulares).

En este caso la configuración admite las siguientes posibilidades:

- Sistemas de una etapa de desalación o de arreglo simple.
- Sistemas de varias etapas de desalación o de arreglo múltiple.

. Sistemas de OI de arreglo simple.

Se consideran para lograr altas producciones y siempre que la recuperación del sistema no supere un valor en torno al 55%.

Se trata de sistemas de OI de varios módulos con disposición de los mismos en paralelo.

La corriente de alimentación al sistema se conduce hacia el colector del mismo nombre, a partir del cual se divide en tantas como módulos en paralelo tenga el sistema. Mientras que las corrientes de los productos y rechazos de cada módulo se recogen por separado en sus respectivos colectores desde son enviadas a las líneas generales de producto y rechazo del sistema, como se muestra en la figura adjunta.

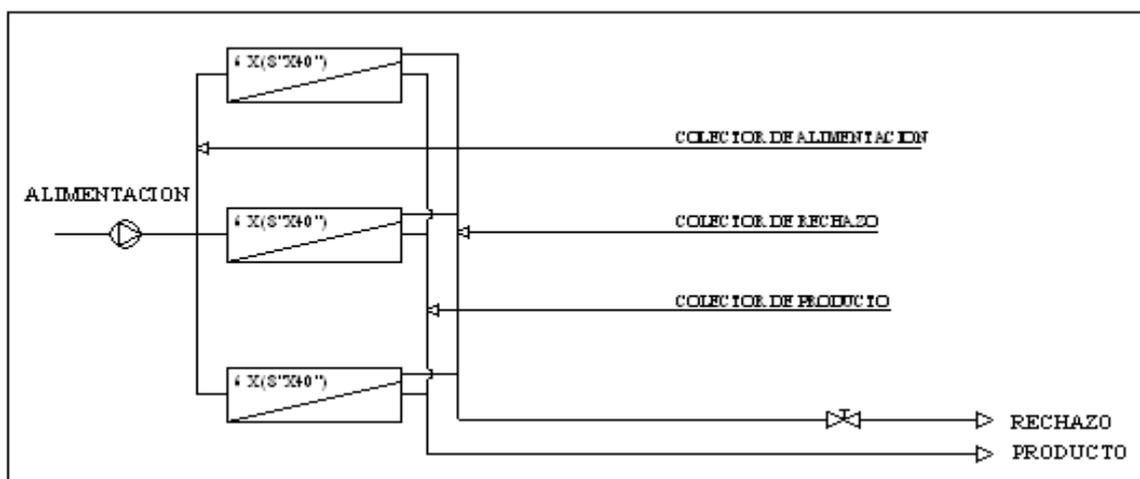


FIGURA F-V/16

. Sistemas de OI de arreglo múltiple.

Se consideran para lograr altas producciones y siempre que la recuperación final del sistema sea superior a un valor en torno al 55%.

Se trata de sistemas de OI de varios módulos con disposición mixta de los mismos.

En estos casos el arreglo del sistema es múltiple, es decir según dos o mas etapas de desalación.

Aplicados a la desalación de aguas salobres, y sin sobrepasar los límites de la guía de diseño del fabricante, con dos etapas pueden lograrse normalmente, recuperaciones comprendidas entre 55 y 85%.

También pueden conseguirse altas recuperaciones, incluso superiores a las anteriores, aumentando el número de etapas.

En general, el flujo de alimentación a la 2ª etapa es el concentrado de la 1ª, y así sucesivamente. Mientras que el rechazo final del sistema es el concentrado de la última etapa.

En orden a conseguir que los flujos de alimentación a cada uno de los módulos sean aproximadamente uniformes, así como los concentrados y productos de cada uno de ellos y mantenerlos dentro de las especificaciones de la guía de diseño antes mencionada, el número de módulos por etapa decrece en la dirección del flujo de alimentación.

El arreglo del sistema de OI admite varias posibilidades, entre las cuales, las mas utilizadas son las mostradas (*Tabla T-V/2*):

TABLA T-V/2

ARREGLO	Nº ETAPAS	RELACION ENTRE ETAPAS	MODULOS 1ªE	MODULOS 2ªE	MODULOS 3ªE	RECUPERACIÓN MÁXIMA (*)
N : 2N/3	2	3:2	N	2N/3	-	80
N : N/2	2	2:1	N	N/2	-	85
N : 2N/3 : N/3	3	3:2:1	N	2N/3	N/3	85
N : N/2 : N/4	3	4:2:1	N	N/2	N/4	87,5

(*): Valores aproximados.

Las cifras de la última columna, como se indica, son aproximadas y están basadas sobre el supuesto del uso de módulos con 6 elementos de OI de 1 m de longitud (40"), con objeto de no exceder la recuperación máxima por elemento de OI, de acuerdo a la tabla T-V/1.

En tubos más cortos, como es el de 3 membranas o cartuchos, para lograr una misma recuperación del sistema el número de etapas, debe ser aproximadamente el doble.

Así, un sistema de arreglo múltiple, con relación entre etapas 2:1, como el mostrado en la figura adjunta, será un sistema de OI con 2 etapas de desalación, siendo el número de módulos de la 1ª etapa doble del número de módulos de la 2ª.

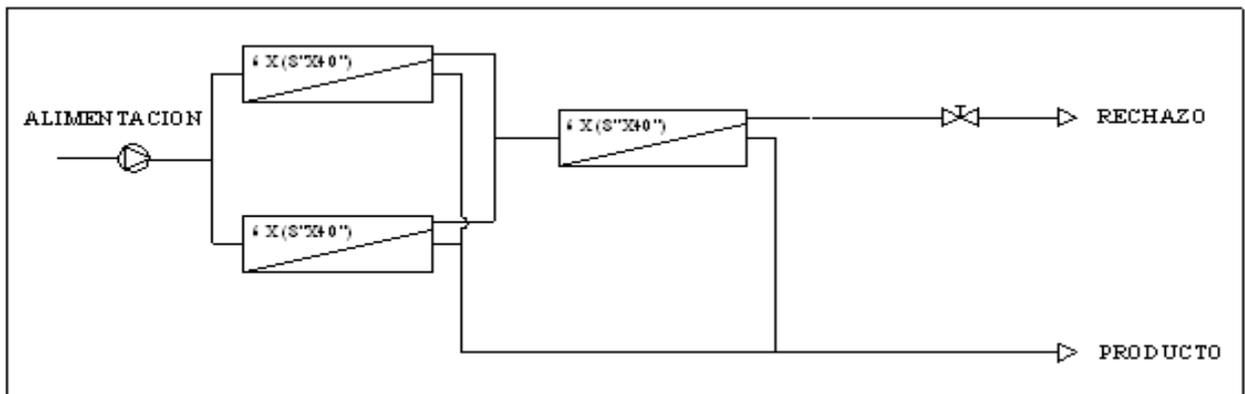


FIGURA F-V/17

En el Capítulo 3, figura F-III/15, se muestra un sistema de OI de 3 etapas de desalación con arreglo 4:2:1.

Como quiera que la corriente de alimentación a lo largo de las etapas sucesivas se vuelve más concentrada, mientras que la presión de esta decrece, una forma de contrarrestar esto sería mediante la instalación entre etapas de bombas de sobrealimentación debidamente reguladas y controladas. Motivo por el cual, en la práctica, los sistemas a 3 etapas están en desuso, siendo preferidos los sistemas a dos etapas, en la medida en la que esto sea posible.

Los sistemas de arreglo múltiple admiten la posibilidad, menos frecuente, de recirculación interna de parte del concentrado de cada etapa hacia la alimentación de esta, mediante el uso de una bomba de sobrealimentación para cada etapa. Como sería el caso de la figura adjunta.

En este caso, el caudal de alimentación a la primera etapa estaría formado por el volumen de agua de alimentación proveniente de la sección de pretratamiento de la planta mas una cierta fracción del concentrado de esta primera etapa.

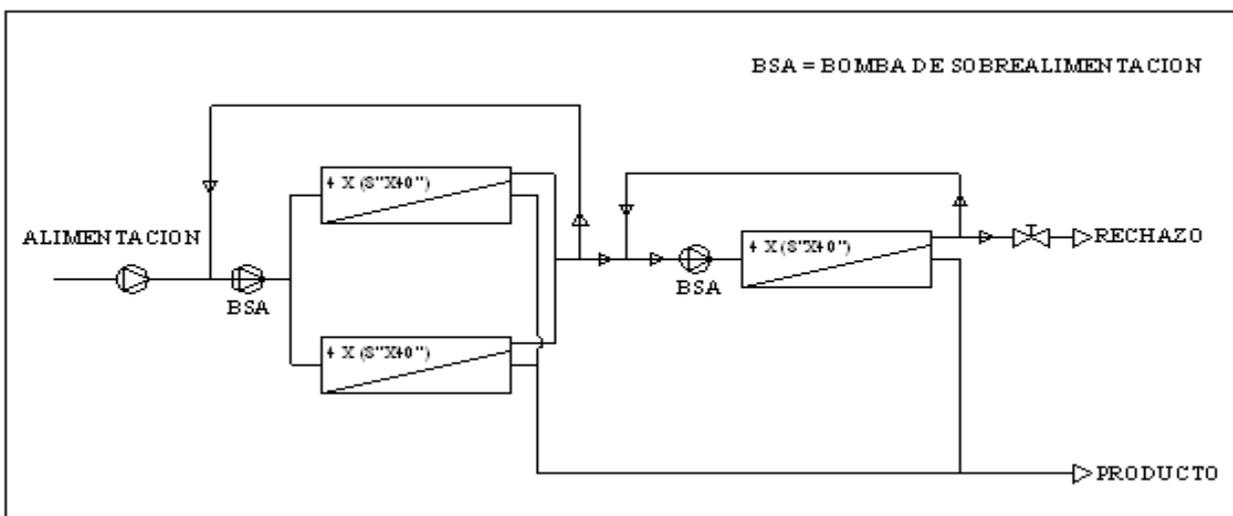


FIGURA F-V/18

La alimentación a la segunda etapa estaría formada por el resto del concentrado de la 1ª y parte del concentrado de esta 2ª, y así sucesivamente para el resto de las etapas del sistema.

De esta forma las alimentaciones reales a cada una de las etapas, se vuelven gradualmente mas concentradas.

Los sistemas de arreglo múltiple con recirculación del concentrado se utilizan en casos concretos y poco frecuentes, en los que el número de cartuchos de membrana por módulo de OI (tubo) es demasiado pequeño para conseguir una recuperación suficientemente alta. P.e. cuando se ha producido una mejora en las condiciones del agua a tratar que permite incrementar el nivel de conversión de la planta, habiendo sido diseñada esta para las condiciones previas a esta mejora. También se emplean en ciertas aplicaciones especiales de procesamiento de líquidos y aguas residuales.

Por las razones anteriores, de este tipo de sistemas aquí solo hacemos referencia, pero no los vamos a considerar en este trabajo de tesis.

Existen otros tipos de sistemas de OI, variantes de los considerados hasta aquí, entre los cuales se encuentra:

. *Sistemas con 2 pasos de desalación.*

Se utilizan cuando es necesaria una mayor calidad en el producto final. Este sistema, como se muestra en la figura adjunta, es la combinación de 2 sistemas de OI como los vistos anteriormente. El agua de alimentación del 2º sistema sería el producto del 1º.

En estos casos es práctica habitual que el concentrado del 2º sistema se recicle hacia la alimentación del 1º, debido a que, normalmente presenta una mejor calidad que esta.

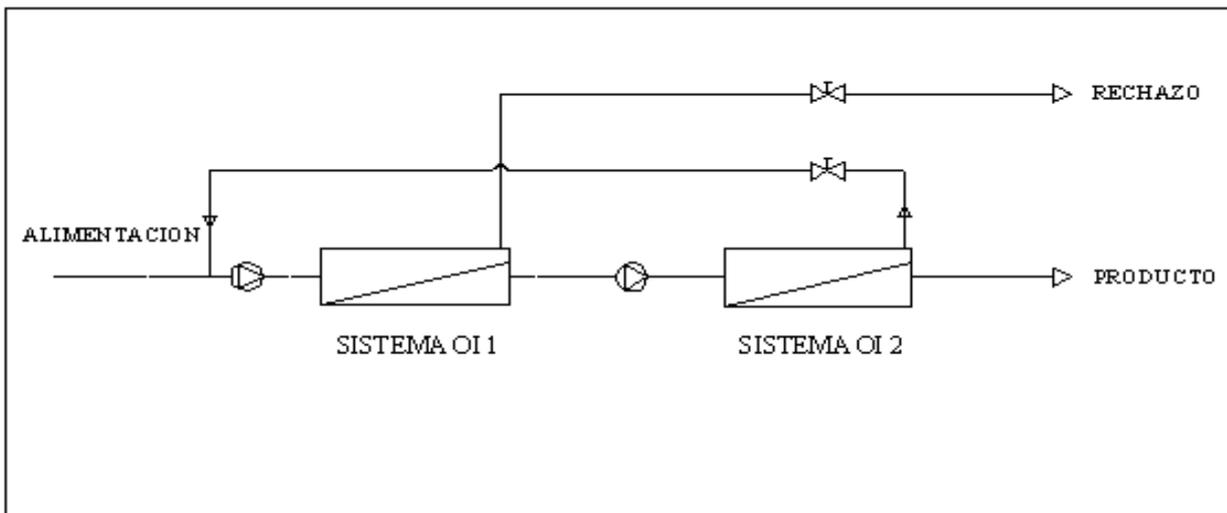


FIGURA F-V/19

De igual forma, como la calidad del permeado del primer paso (alimentación del 2º) es alta ($SDI < 1$), esto permite diseñar el sistema 2 para una recuperación superior a la del sistema 1, guía de diseño, tabla T-V/1.

5.5.3.- Elección del sistema de OI.

A partir de los datos iniciales, como son el nivel de producción a obtener y las condiciones del agua de alimentación a tratar (recuperación máxima), debemos elegir el sistema de OI a utilizar.

Los pasos a seguir serán por tanto, seleccionar los elementos de OI, el número de estos por módulo, el número de módulos, el arreglo y la disposición de los mismos en las etapas del arreglo.

. Selección del elemento de OI.

Físicamente, los parámetros que caracterizan a los elementos de OI de arrollamiento en espiral, son su diámetro, longitud y superficie de membrana alojada en su interior. Los tipos comercializados para su aplicación a la desalación de aguas

corresponden a los diámetros de 2,5", 4" y 8", con longitud estándar de 40". Como ya se ha indicado, a nivel industrial son los que corresponden a los diámetros de 4" y 8", los empleados en la mayoría de las aplicaciones, tanto de agua salobre como de mar.

Las características de operación son su presión de diseño y el rechazo de sales. Así p.e., los tipos comercializados por Dow Chemical y equipados con la membrana FT30 de Filmtec, de 4"X40" y de 8"X40", tienen las siguientes designaciones generales.

TABLA T-V/3

DESIGNACIÓN	ALIMENTACIÓN (STD)	PRESION MÁXIMA (Kg/cm ²)	RECHAZO DE SALES (%)
TW	<1.000 mg/l	21	90-95
BW	<15.000 mg/l	42	95-99
SW	<50.000 mg/l	70	>99

Existen distintos elementos dentro de las designaciones TW (Tap Water), BW (Brackish Water) y SW (Sea Water). Diferenciándose entre ellos en la superficie de membrana alojada en su interior (superficie activa), y por tanto en su capacidad para producir agua (Tabla T-V/1).

Centrándonos en la desalación de aguas salobres (STD<15.000 mg/l), a continuación se indican algunos tipos de elementos comercializados con la designación BW de 4" y 8" de diámetro y 40" de longitud. Para cada uno de ellos se muestra la superficie de membrana contenida, y en función de esta, y para un agua de alimentación salobre, procedente de pozo ($1 \leq \text{SDI} < 3$), el flujo máximo de producto deducido a partir de la tabla T-V/1.

TABLA T-V/4-1: ELEMENTOS DE OI DE 4"X40"

TIPO DE ELEMENTO	SUPERFICIE MEMBRANA (ft ² /m ²)	PRODUCCION MÁXIMA (m ³ /día)
BW30-4040	70/6,5	6,8
BW30LP-4040	78/7,25	7,6

TABLA T-V/4-2: ELEMENTOS DE OI DE 8"X40"

TIPO DE ELEMENTO	SUPERFICIE MEMBRANA (ft ² /m ²)	PRODUCCION MÁXIMA (m ³ /día)
BW30-330(*)	330/31	28
BW30-365	365/34	30,7
BW30-400	400/37	33,4
BW30-440	440/41	37

(*): Equivalente al tipo BW30-8040.

La elección del tipo de elemento de OI a utilizar estará en función de la capacidad deseada de la planta, así como del nivel de conversión. Ya que desde el punto de vista económico, si comparamos un elemento de 4"X40", con el equivalente de 8"X40", el coste de este último es de aproximadamente 2,5 veces el de aquel, mientras que la producción máxima es del orden de 4 veces. Por tanto, resultará más económico utilizar 1 elemento de OI de 8" que 4 de 4", siempre que la conversión de la planta lo permita.

En una primera selección, en general y por las razones económicas antes mencionadas, podemos establecer que para producciones medias por elemento superiores a 0,6 m³/h se elegirán elementos de 8", y usaremos elementos de 4" para producciones inferiores.

Elegido el elemento de OI a emplear, el número mínimo de estos (N_{Emin}), en principio, vendría dado por el cociente:

$$N_{Emin} = Q_p / Q_{pemax} \quad (Ec.13/5)$$

Siendo:

Q_p = Flujo de producto deseado (Producción de la planta).

Q_{pemax} = Flujo máximo de producto por elemento (Tablas T-V/4).

. Selección del número de elementos por módulo de OI.

El número de elementos en serie a instalar por módulo de OI, normalmente de 1 a 6 en desalación de aguas salobres, depende de la conversión del sistema como ya se ha visto. De estos, será el primer elemento de la serie el de mayor producción, ya que su alimentación será la de menor concentración de sales y dispone de la mayor presión, y por tanto la condición de máximo flujo de producto debemos aplicarla a ese elemento. El incremento de la concentración de sales en la dirección del flujo de alimentación y la caída de presión en los propios elementos, producen una reducción en la presión neta o efectiva de operación de los elementos de la serie y por tanto una reducción gradual en su producción (apartado 5.2).

En casi todas las aplicaciones de agua salobre prácticas, agua de alimentación con $SDI < 5$, $STD < 15000$ y $10^{\circ}C < T < 30^{\circ}C$, ha resultado ser una buena aproximación considerar el flujo medio de permeado por elemento de la serie (Q_{pemed}), como un porcentaje del flujo máximo (flujo del primer elemento), de la forma que se muestra en la tabla T-V/5.

TABLA T-V/5

CONVERSIÓN (%)	ELEMENTOS POR MODULO	PRODUCCION MEDIA POR ELEMENTO (Q_{pemed})
≤ 15	1	Q_{pemax}
15-25	2	$0,95Q_{pemax}$
25-35	3	$0,90Q_{pemax}$
35-40	4	$0,85Q_{pemax}$
40-45	5	$0,80Q_{pemax}$
45-55	6	$0,75Q_{pemax}$

Q_{pemax} = Flujo máximo de producto por elemento (Tablas T-V/1 y T-V/4).

Para conversiones superiores, el sistema de OI como se ha visto sería de arreglo múltiple. En estos casos la producción media por elemento en módulos de 6 sería inferior al valor indicado en la última fila de la tabla T-V/5, ya que por las mismas consideraciones antes expuestas, tendríamos que considerar las disminuciones en la producción de los elementos en serie de las siguientes etapas. Así, puede estimarse

que la producción media por elemento de un sistema de arreglo múltiple de 2 etapas de 6 elementos por módulo sea de $0,65Q_{p\text{emáx}}$ y $0,55Q_{p\text{emáx}}$ la correspondiente a un sistema de 3 etapas.

. Selección del número de módulos del sistema de OI.

Teniendo en cuenta lo anterior, el número de elementos a utilizar por módulo en un sistema de OI, que opere al 50% de conversión con agua de alimentación procedente de pozo con $SDI < 3$, será de 6 ($N_{Em} = 6$). Y el total de elementos del sistema puede estimarse, inicialmente, en:

$$N_{Eini} = Q_p / Q_{p\text{emed}} = Q_p / 0,75Q_{p\text{emax}} \quad (\text{Ec.14/5})$$

Por tanto el número de tubos de presión (módulos) de 6 elementos, del sistema de OI de la planta, inicialmente sería:

$$N_{mini} = N_{Eini} / 6 = Q_p / 4,5Q_{p\text{emax}} \quad (\text{Ec.15/5})$$

Redondeándose al valor entero superior más próximo (N_m). Siendo $N_E = 6 \times N_m$, el número total definitivo de elementos de OI del sistema.

. Selección del arreglo del sistema de OI.

Las condiciones del agua de alimentación, como se ha visto en capítulos anteriores, nos indican el nivel de conversión máxima al que puede operar el sistema, y por tanto qué sistema de OI deberemos emplear (arreglo simple o múltiple), de acuerdo a los apartados anteriores, para no exceder las condiciones impuestas en la guía del fabricante.

A continuación se indican las estimaciones anteriores en un ejemplo típico aclaratorio.

Datos de partida:

- Producción de la planta: $600 \text{ m}^3/\text{día} = 25 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Tipo de agua a tratar: Salobre.
- Procedencia del agua a tratar: Pozo (SDI<3).
- Conversión estimada según condiciones del agua de alimentación (Capítulo III): 75%.

Estimaciones:

Dada la producción de la planta, si adoptamos como elemento de OI a utilizar el BW30-8040, al que corresponde un flujo máximo de permeado, para las condiciones del agua a tratar, de $28 \text{ m}^3/\text{día}$ (Tabla T-V/4-2). El nivel de conversión de la misma (75%) nos permite emplear módulos de 6 elementos dispuestos según un arreglo múltiple de 2 etapas, tipo 2:1 (Tabla T-V/2).

Por lo que el número de elementos del sistema de OI, inicialmente será:

$$N_{\text{Eini}} = Q_p / 0,65Q_{\text{pemax}} = 600 / (0,65 \times 28) = 33.$$

El número de módulos del sistema, inicialmente será:

$$N_{\text{mini}} = N_{\text{Eini}} / 6 = 33 / 6 = 5,5 \approx 6.$$

Por tanto el arreglo definitivo será:

$$4 \times 6 (\text{BW30-8040}) : 2 \times 6 (\text{BW30-8040})$$

Y el número total definitivo de módulos de OI a instalar será de:

$$N_m = 4 + 2 = 6.$$

Y el número total definitivo de elementos de OI a instalar será de:

$$N_E = 6 \times 6 = 36.$$

5.5.4.- Características de operación del sistema.

Antes de comenzar con el diseño, propiamente dicho, del rendimiento del sistema de OI de una planta de desalación de aguas salobres, conviene familiarizarnos con las características de operación del mismo.

Cuando un elemento de OI está funcionando de forma individual, las características de operación pueden medirse rápidamente, y se puede deducir fácilmente su rendimiento.

Ahora bien, cuando un gran número de elementos están combinados en un sistema de OI de arreglo múltiple, y solo se conocen las variables de operación de la entrada al sistema, la predicción del rendimiento de este se vuelve mas compleja, ya que las presiones de alimentación y las concentraciones de sales de los distintos elementos dispuestos en serie cambian de uno a otro. El grado y la extensión de estos cambios dependen no solo de las condiciones de entrada del agua de alimentación y de la recuperación total del sistema, sino también de la configuración del arreglo.

Las características de operación pueden explicarse con dos ejemplos típicos: sistema de un módulo de OI y sistema de 3 módulos de OI con arreglo múltiple 2:1.

En ambos casos, se disponen 6 elementos en serie por módulo y con objeto de fijar criterios, consideraremos que el agua a tratar sea procedente de pozo (SDI<3) y que los elementos de OI sean de 8"X40", concretamente el tipo BW30-8040 de Filmtec, al que corresponde, según la guía de diseño del fabricante, una recuperación máxima por elemento del 19%, una producción máxima de 28 m³/día (1,17 m³/h), siendo el flujo mínimo de concentrado de 3,6 m³/h y el flujo máximo de alimentación de 14 m³/h.

Si fijamos el nivel de producción de acuerdo a la *Tabla T-V/5*, para no exceder el máximo flujo de alimentación al primer elemento de la serie.

Las condiciones ideales de operación, mínimo flujo de concentrado (máxima conversión), para los dos ejemplos, se muestran en las figuras *F-V/20* y *F-V/21*.

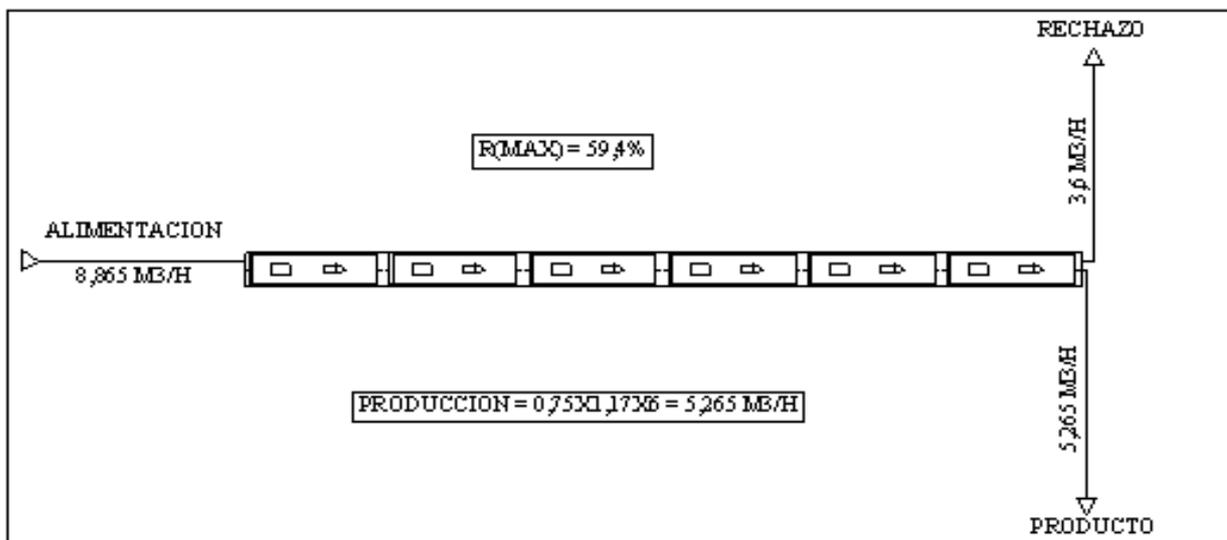


FIGURA F-V/20

En el primer caso correspondería al primer elemento de la serie, el máximo flujo de producción (1,17 m³/h) y al último el mínimo flujo de concentrado (3,6 m³/h). Y la recuperación media por elemento (10%) varia aproximadamente, desde un 13% para el primero de la serie a un 7% para el último. La recuperación máxima del módulo seria del 59,4%, para recuperaciones superiores tendríamos que adoptar sistemas de arreglo múltiple (2 etapas). En sentido opuesto, si mantenemos la producción de 5,265 m³/h, y operamos el módulo a una conversión muy baja, p.e. inferior a un 40%, el flujo de alimentación superaría el máximo admisible por el primer elemento de la serie.

Por lo que para recuperaciones inferiores tendríamos que disponer menos de 6 elementos en el módulo.

A la vista de lo anterior parece razonable operar el módulo de 6 elementos con un nivel de conversión comprendido entre el 45 y 55%, como se indicó en la tabla T-V/5,

para tener el suficiente margen de seguridad y no llegar a las condiciones límite.

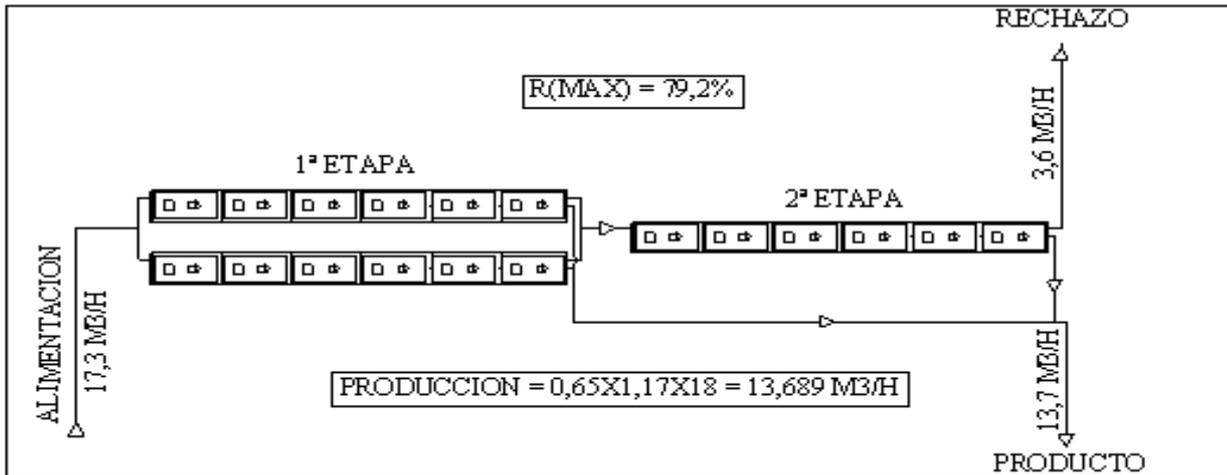


FIGURA F-V/21

En el segundo caso (Figura F-V/21) correspondería a los primeros elementos de las dos series de la 1ª etapa, el máximo flujo de producción (1,17 m³/h) y al último elemento de la serie de la 2ª etapa, el mínimo flujo de concentrado (3,6 m³/h). La recuperación máxima del sistema sería del 79,2%, para recuperaciones superiores, en principio, tendríamos que adoptar sistemas de arreglo múltiple de 3 etapas. En sentido opuesto, si operamos el sistema a una conversión muy baja, p.e. inferior a un 50%, el flujo de alimentación superaría el máximo admisible por los primeros elementos de las dos series de la 1ª etapa.

Por lo que para recuperaciones inferiores tendríamos que disponer menos de 6 elementos por módulo del sistema, o lo que sería más lógico (más económico), utilizar un sistema de arreglo simple.

A la vista de lo anterior parece razonable operar el sistema de arreglo múltiple 2:1, de 6 elementos por módulo, con un nivel de conversión comprendido entre el 55 y 75%, para tener el suficiente margen de seguridad y no llegar a las condiciones límite.

Evidentemente, todo el desarrollo anterior está referido a unas condiciones del

agua de alimentación ($SDI < 3$). Si el agua de aporte presentase un $SDI < 1$ (permeado de un primer paso de desalación), los límites anteriores no serían tan restrictivos, pudiéndose llegar a una conversión del 87%, con el arreglo múltiple 2:1. Por el contrario si el agua de entrada al sistema de OI tuviese un SDI comprendido entre 3 y 5, el nivel máximo de recuperación del sistema con arreglo 2:1 sería del 70%.

5.5.5.- Ecuaciones y parámetros de diseño.

El rendimiento de un sistema de OI específico viene definido por el flujo de permeado (agua producto) o por su presión de alimentación, si es aquel el que se indica, y por el paso de sales.

Las ecuaciones básicas de diseño en las que nos apoyaremos son las ecuaciones de transporte indicadas en el apartado 5.2 de este Capítulo:

$$Q_{a_m} = K_{a_m}(P_{d_m} - \pi_{d_m})A_m \quad (Ec.1/5)$$

$$Q_{s_m} = K_{s_m} \cdot C_{d_s_m} \cdot A_m \quad (Ec.2/5)$$

Las ecuaciones anteriores pueden ser aplicadas en las 3 formas siguientes:

- Elemento de OI a elemento de OI.
- Modulo de OI a modulo de OI.
- Sistema de OI.

En el primer caso, el método de cálculo sería el más riguroso, demasiado teórico, tedioso, y poco útil para las aplicaciones prácticas de este trabajo de tesis.

Todas las condiciones de operación del primer elemento de OI del sistema deben ser conocidas, incluso la presión de alimentación.

Entonces puede calcularse el flujo, presión, etc. del concentrado o rechazo de este elemento, que será la alimentación del segundo elemento. Después de calcular los resultados para todos los elementos, puede deducirse si la presión de alimentación original del primero de ellos fue demasiado alta o baja, y deberá procederse a repetir el procedimiento desde el principio con una nueva presión, menor o mayor, según el caso. Y así hasta conseguir que las condiciones de operación reales sean las ideales.

En el segundo caso, aplicando las ecuaciones a cada tubo de presión del sistema, el método de cálculo sería similar al anterior, demasiado teórico y poco práctico para nuestro caso.

Finalmente se ha adoptado el tercer caso, ya que por su comodidad y sencillez, normalmente, es el más deseado en aplicaciones prácticas de desalación de aguas salobres.

Comoquiera que el comportamiento de las membranas alojadas en los diferentes elementos de OI, no es exactamente el mismo, varía de unas a otras, e incluso de un módulo a otro, ya que el procedimiento de fabricación no es completamente exacto. Desde el punto de vista ingenieril resulta más conveniente adoptar los valores medios.

Se usan los valores medios para calcular la presión de alimentación y la calidad del permeado (producto) del sistema de OI, a partir de que sean supuestamente conocidos, por un lado y como datos de partida, la calidad de la alimentación, la temperatura y el flujo deseado de agua producto. Y por otro y obtenidos a partir de los anteriores, el número de elementos, el número de módulos que constituyen el sistema, así como su disposición (arreglo).

Si en lugar del número de elementos, se especifica la presión de alimentación, entonces puede calcularse aquel, con unas pocas iteraciones.

Este método da un resultado aceptable como se verá más adelante con ejemplos prácticos aclaratorios.

El procedimiento a seguir es, por tanto, como sigue:

A partir de los datos iniciales de partida, como son las condiciones del agua bruta a tratar y de la capacidad de producción de la planta, se estima la recuperación del sistema de OI, así como su arreglo (tipo, número y disposición de los elementos de OI) a considerar inicialmente, según apartados anteriores. Por aplicación de la ecuación de diseño 1/5, se obtiene la presión de operación del sistema. En el caso de que resulte demasiado alta o baja aquella, se procedería a aumentar o disminuir, según el caso, el número de módulos y por tanto, de elementos de OI, procediéndose a realizar los cálculos para el nuevo sistema de OI a considerar. Finalmente aplicando la ecuación (Ec.2/5) obtendríamos la calidad del agua producto para el sistema de OI definitivo.

Teniendo en cuenta que el término $(P_{d_{mi}} - \pi_{d_{mi}})$ de la Ec.1/5, presión neta o efectiva sobre el elemento de OI i, puede expresarse de la siguiente forma:

$$(P_{d_{mi}} - \pi_{d_{mi}}) = P_{ai} - \Delta \bar{P}_{ari} / 2 - P_{pi} - (\pi_{ari} - \pi_{pi})$$

Siendo:

P_{ai} = Presión de alimentación al elemento de OI i.

$\Delta \bar{P}_{ari}$ = Caídas de presión alimentación / rechazo en el elemento de OI i.

P_{pi} = Presión del permeado o agua producto del elemento de OI i.

π_{ari} = Presión osmótica de la concentración media alimentación / rechazo sobre la superficie de la membrana del elemento de OI i, por el lado del concentrado.

π_{pi} = Presión osmótica de la concentración media del agua producto del elemento de OI i.

Teniendo en cuenta la polarización de la concentración (apartado 5.3), la (Ec.26/4) del Capítulo IV puede escribirse en la forma:

$$\pi_{ari} = \pi_{ai} \times FR_i \times PC_i$$

Siendo:

π_{ai} = Presión osmótica del agua de alimentación al elemento i.

FR_i = Factor de recuperación del elemento i.

PC_i = Polarización de la concentración en el elemento i.

Y designando por R_{si} el rechazo de sales del elemento i expresado en tanto por uno, es decir:

$$R_{si} = (C_{ai} - C_{pi}) / C_{ai}$$

Siendo:

C_{ai} = Concentración de la solución de alimentación al elemento i.

C_{pi} = Concentración de la solución de permeado del elemento i.

Podemos considerar:

$$\pi_{pi} = \pi_{ai} \times (1 - R_{si})$$

Y por tanto:

$$(P_{d_{mi}} - \pi_{d_{mi}}) = P_{ai} - \Delta \bar{P}_{ar} / 2 - P_{pi} - \pi_{ai} [(FR_i \times PC_i) - (1 - R_{si})]$$

Por lo que, la ecuación de diseño (Ec.1/5), referida al conjunto del sistema de OI y considerando los valores medios por elemento de OI, podemos escribirla de la siguiente forma práctica:

$$Q = \sum Q_{ami} = \sum K_{ami} (P_{d_{mi}} - \pi_{d_{mi}}) A_{mi} = N_E \cdot S_E \cdot \bar{K} a_m (\pi_{ar}) \cdot FT \cdot Ft \cdot \{P_a - \Delta \bar{P}_{ar} / 2 - P_p - \pi_a [(FR \cdot \bar{PC}) - (1 - \bar{R}_s)]\} \quad (Ec.16/5)$$

en la cual:

Q = Flujo de permeado (Capacidad de producción de la planta).

Q_{ami} = Flujo de permeado del elemento de OI i.

K_{ami} = Coeficiente de permeabilidad al agua, del elemento de OI i.

$P_{d_{mi}}$ = Presión diferencial a través de la membrana del elemento de OI i o diferencia de presiones entre los dos lados de la capa activa de la membrana de ese elemento.

$\pi_{d_{mi}}$ = Presión osmótica diferencial a través de la membrana del elemento de OI i o diferencia de las presiones osmóticas correspondientes a las soluciones de ambos lados de la membrana de ese elemento.

A_{mi} = Superficie de la membrana del elemento de OI i.

N_E = Número total de elementos del sistema de OI.

S_E = Superficie de membrana por elemento de OI.

$\bar{K} a_m (\pi_{ar})$ = Coeficiente de permeabilidad al agua medio, en función de la presión

osmótica de la concentración media alimentación-rechazo, sobre la superficie de la membrana, a la temperatura de 25°C.

FT = Factor de corrección por temperatura.

Ft = Factor de corrección por tiempo de operación.

P_a = Presión de alimentación al sistema de OI.

$\Delta \bar{P}_{ar}$ = Caída de presión alimentación / rechazo del sistema de OI.

P_p = Presión del permeado o agua producto.

π_a = Presión osmótica del agua de alimentación.

FR = Factor de recuperación del sistema de OI.

\bar{PC} = Valor medio de la polarización de la concentración de todos los elementos de OI del sistema.

\bar{R}_s = Valor medio del rechazo de sales de todos los elementos de OI del sistema, expresado en tanto por uno.

Ecuación en la que procederíamos a sustituir parámetros conocidos. Así, $\bar{K} a_m$ (π_{ar}) (coeficiente de permeabilidad al agua medio, en función de la presión osmótica de la concentración media sobre la superficie de la membrana, a la temperatura de 25°C), depende de la membrana empleada y sería un dato normalmente proporcionado por el fabricante de la misma.

En nuestro caso, Filmtec Co. En su manual técnico propone los siguientes valores:

$$\bar{K} a_m (\pi_{ar}) = 0,125. \text{ Para } \pi_{ar} \leq 25 \text{ psi.} \quad (\text{Ec.17/5})$$

$$\bar{K} a_m (\pi_{ar}) = 0,125 - [0,011(\pi_{ar} - 25)/35]. \text{ Para } 25 \leq \pi_{ar} \leq 200 \text{ psi.} \quad (\text{Ec.18/5})$$

$$\bar{K} a_m (\pi_{ar}) = 0,125 - [0,0001(\pi_{ar} - 200)]. \text{ Para } 200 \leq \pi_{ar} \leq 400 \text{ psi.} \quad (\text{Ec.19/5})$$

En las 3 ecuaciones anteriores $\bar{K} a_m (\pi_{ar})$, se expresa en galones por pié cuadrado y día, y por psi (galones / (ft².dia.psi)).

Siendo π_{ar} según las ecuaciones (Ec.26/4), (Ec.29/4) y (Ec.9/5):

$$\begin{aligned} \pi_{ar} &= \pi_a \times FR \times \bar{PC} = \pi_a \times \{[\text{Ln}(100/(100-R))] / (R/100)\} \times \bar{PC} = \\ &= \pi_a \times \{[\text{Ln}(100/(100-R))] / (R/100)\} \times e^{0,7 \bar{R}_i} \end{aligned} \quad (\text{Ec.20/5})$$

Ecuación en la que:

R = Recuperación o conversión del sistema de OI en %.

\bar{R}_i = Recuperación media por elemento de OI del sistema, expresada en tanto por uno.

Puede estimarse aproximadamente que:

$$\bar{R}_i = 1 - [1-(R/100)]^{1/n} \quad (\text{Ec.21/5})$$

Siendo:

n = N° de elementos en serie por módulo y etapa del sistema de OI.

Así p.e., si el sistema de OI a considerar, es de arreglo simple (1 etapa de desalación), opera a una conversión del 50% y sus módulos de OI disponen de 6 elementos en serie c/u. Puede estimarse la recuperación media por elemento de OI en:

$$\bar{R}_i = 1 - [1-(R/100)]^{1/n} = 1 - [1-(50/100)]^{1/6} = 0,109 \text{ (10,9\%)} \quad (\text{Ec.22/5})$$

Correspondería una polarización de la concentración media por elemento de OI de:

$$\overline{PC} = e^{0,7 \bar{R}_i} = e^{0,7 \times 0,109} = 1,08. \quad (\text{Ec.23/5})$$

Y la presión osmótica de la concentración media sobre la superficie de la membrana, por elemento de OI, sería:

$$\pi_{ar} = \pi_a \times \{[\text{Ln}(100/(100-R)) / (R/100)]\} \times PC =$$

$$\pi_a \times \{[\text{Ln}(100/(100-R)) / (R/100)]\} \times e^{0,7 \bar{R}_i} = \pi_a \times \{[\text{Ln}(100/(100-50)) / (50/100)]\} \times 1,08 = \pi_a \times \{[\text{Ln}(100/50)] / 0,5\} \times 1,08 = 1,497 \times \pi_a. \quad (\text{Ec.24/5})$$

Si el sistema de OI utilizado es de arreglo múltiple 3:2 o 2:1 (2 etapas de desalación), opera a una conversión del 70% y sus módulos de OI disponen de 6 elementos en serie c/u. La recuperación media por elemento sería:

$$\bar{R}_i = 1 - [1-(R/100)]^{1/n} = 1 - [1-(70/100)]^{1/12} = 0,095 \text{ (9,5\%)} \quad (\text{Ec.25a/5})$$

La polarización de la concentración media por elemento de OI del sistema sería entonces de:

$$\overline{PC} = e^{0,7 \bar{R}_i} = e^{0,7 \times 0,095} = 1,07. \quad (\text{Ec.26a/5})$$

Y la presión osmótica de la concentración media sobre la superficie de la membrana, por elemento de OI del sistema, sería:

$$\pi_{ar} = \pi_a \times \{[\text{Ln}(100/(100-R)) / (R/100)]\} \times PC =$$

$$\pi_a \times \{[\text{Ln}(100/(100-R)) / (R/100)]\} \times e^{0,7 \bar{R}_i} =$$

$$\begin{aligned} \pi_a \times \{[\ln(100/(100-70))] / (70/100)\} \times 1,07 = \\ \pi_a \times \{[\ln(100/30)] / 0,7\} \times 1,07 = 1,84 \times \pi_a. \end{aligned} \quad (Ec.27a/5)$$

Si el sistema de OI utilizado es de arreglo múltiple 3:2:1 o 4:2:1 (3 etapas de desalación), opera a una conversión del 80% y sus módulos de OI disponen de 6 elementos en serie c/u. La recuperación media por elemento sería:

$$\bar{R}_i = 1 - [1-(R/100)]^{1/n} = 1 - [1-(80/100)]^{1/6} = 0,085 \text{ (8,5\%)}. \quad (Ec.25b/5)$$

La polarización de la concentración media por elemento de OI del sistema sería entonces de:

$$\overline{PC} = e^{0,7 \bar{R}_i} = e^{0,7 \times 0,085} = 1,06. \quad (Ec.26b/5)$$

Y la presión osmótica de la concentración media sobre la superficie de la membrana, por elemento de OI del sistema, sería:

$$\begin{aligned} \pi_{ar} = \pi_a \times \{[\ln(100/(100-R))] / (R/100)\} \times PC = \\ \pi_a \times \{[\ln(100/(100-R))] / (R/100)\} \times e^{0,7 \bar{R}_i} = \\ \pi_a \times \{[\ln(100/(100-80))] / (80/100)\} \times 1,06 = \\ \pi_a \times \{[\ln(100/20)] / 0,8\} \times 1,06 = 2,13 \times \pi_a. \end{aligned} \quad (Ec.27b/5)$$

Continuando con el análisis de los términos de la ecuación (Ec.16/5), $\Delta \bar{P}_{ar}$ (caída de presión alimentación-rechazo del sistema de OI), subirá con el ensuciamiento si algún tipo de agente ensuciante está presente en el agua. Siendo el más importante parámetro en determinar cuando la limpieza es requerida. En nuestro caso, como el posible ensuciamiento del sistema de OI se considera a través del factor de corrección por tiempo de operación (Ft). Consideraremos que $\Delta \bar{P}_{ar}$ depende del flujo, de las características geométricas del elemento, del número de estos por módulo y del arreglo del sistema de OI.

Es otro dato proporcionado por el fabricante en función de los niveles de flujo de alimentación, producto y rechazo. Así Filmtec Co, en su Manual Técnico, para sus membranas de agua salobre (BW), de 4"X40" y de 8"X40", propone las siguientes ecuaciones:

- Para sistemas de OI de 1 etapa (arreglo simple):

. Para los elementos de 4"X40":

$$\Delta \bar{P}_{ar} = 0,1 \times n \times [\bar{F}_{ar}]^{1,7} \quad (Ec.28a/5)$$

. Para los elementos de 8"X40":

$$\Delta \bar{P}_{ar} = 0,01 \times n \times [\bar{F}_{ar}]^{1,7} \quad (Ec.28b/5)$$

En las ecuaciones anteriores $\Delta \bar{P}_{ar}$ está expresada en psi. Siendo n el número de elementos de OI colocados en serie y \bar{F}_{ar} el valor medio aritmético del flujo de concentrado (alimentación–rechazo) por módulo en paralelo del sistema expresado en galones por minuto (GPM), esto es:

$$\bar{F}_{ar} = (F_a + F_r) / 2$$

Ecuación en la que F_a y F_r son los flujos de alimentación y rechazo del módulo de OI.

Así, si el sistema de OI a considerar, es de arreglo simple (1 etapa de desalación), opera a una conversión del 50%, sus módulos de OI disponen de 6 elementos en serie c/u del tipo 4"X40", siendo el número total de módulos (en paralelo) de 25 y la producción del mismo es de 600 m³/día (110 GPM). El valor medio aritmético del flujo alimentación–rechazo por módulo de OI del sistema será:

$$\bar{F}_{ar} = (F_a + F_r) / 2 = ((220/25) + (110/25)) / 2 = 6,6 \text{ GPM}$$

Y puede estimarse la caída de presión en la corriente alimentación-rechazo del módulo, y por tanto, del sistema de OI en:

$$\Delta \bar{P}_{ar} = 0,1 \times n \times [\bar{F}_{ar}]^{1,7} = 0,1 \times 6 \times 6,6^{1,7} = 14,84 \text{ psi (1,04 kg/cm}^2) \quad (\text{Ec.29a/5})$$

Si para conseguir la misma producción empleáramos 5 módulos en paralelo, con 6 elementos cada uno del tipo 8"X40", se obtendría:

$$\bar{F}_{ar} = (F_a + F_r) / 2 = ((220/5) + (110/5)) / 2 = 33 \text{ GPM}$$

$$\Delta \bar{P}_{ar} = 0,01 \times n \times [\bar{F}_{ar}]^{1,7} = 0,01 \times 6 \times 33^{1,7} = 22,9 \text{ psi (1,6 kg/cm}^2) \quad (\text{Ec.29b/5})$$

- Para sistemas de OI de 2 etapas (arreglo 3:2 o 2:1):

La caída de presión total en la corriente alimentación-rechazo del sistema de OI, puede estimarse por medio de las siguientes expresiones:

. Utilizando elementos de 4"X40":

$$\Delta \bar{P}_{ar} = 0,1 \times n \times (Q/2R)^{1,7} [((100+8n)/N_{m1e})^{1,7} + (13n/N_{m2e})^{1,7}] \quad (\text{Ec.30a/5})$$

. Utilizando elementos de 8"X40":

$$\Delta \bar{P}_{ar} = 0,01 \times n \times (Q/2R)^{1,7} [((100+8n)/N_{m1e})^{1,7} + (13n/N_{m2e})^{1,7}] \quad (\text{Ec.30b/5})$$

- Para sistemas de OI de 3 etapas (arreglo 3:2:1 o 4:2:1):

La caída de presión total en la corriente alimentación-rechazo del sistema de OI, puede estimarse por medio de las siguientes expresiones:

. Utilizando elementos de 4"X40":

$$\Delta \bar{P}_{ar} = 0,1 \times n \times (Q/2R)^{1,7} [((100+8n)/N_{m1e})^{1,7} + (13n/N_{m2e})^{1,7} + (8,2n/N_{m3e})^{1,7}] \quad (\text{Ec.30c/5})$$

. Utilizando elementos de 8"X40":

$$\Delta \bar{P}_{ar} = 0,01 \times n \times (Q/2R)^{1,7} [((100+8n)/N_{m1e})^{1,7} + (13n/N_{m2e})^{1,7} + (8,2n/N_{m3e})^{1,7}] \quad (Ec.30d/5)$$

Ecuaciones en las que $\Delta \bar{P}_{ar}$ está expresada en psi. Siendo Q el flujo de permeado del sistema de OI (capacidad de producción de la planta) expresado en GPM (galones por minuto), R la recuperación o conversión del sistema de OI en %, N_{m1e} el número de módulos de OI (tubos de presión) de la primera etapa del arreglo, N_{m2e} el número de módulos de OI de la segunda etapa y N_{m3e} el número de módulos de la tercera etapa del arreglo.

Si el sistema de OI a considerar, es de 2 etapas, con relación entre etapas 3:2, opera a una conversión del 70%, sus módulos de OI disponen de 6 elementos 8"X40" en serie c/u, siendo el número total de módulos de 5 y la producción del mismo es de 600 m³/día (110 GPM).

. $N_{m1e} = 3$.

. $N_{m2e} = 2$.

Puede estimarse la caída de presión en la corriente alimentación-rechazo del sistema de OI en:

$$\Delta \bar{P}_{ar} = 0,01 \times n \times (110/2 \times 70)^{1,7} [(148/3)^{1,7} + (78/2)^{1,7}].$$

$$\Delta \bar{P}_{ar} = 0,04 \times (755,7 + 506,8) = 50,5 \text{ psi } (3,55 \text{ kg/cm}^2). \quad (Ec.31a/5)$$

Si para conseguir la misma producción empleáramos 6 módulos distribuidos en 2 etapas, con relación entre etapas 2:1, con el mismo tipo de elementos de OI (8"X40"), y el mismo número de ellos por módulo (6), operando a la misma conversión del 70%. Obtendríamos:

. $N_{m1e} = 4$.

. $N_{m2e} = 2$.

Estimándose la caída de presión en la corriente alimentación-rechazo del sistema de OI en:

$$\Delta \bar{P}_{ar} = 0,01 \times n \times (110/2 \times 70)^{1,7} [(148/4)^{1,7} + (78/2)^{1,7}].$$

$$\Delta \bar{P}_{ar} = 0,04 \times 970,2 = 38,8 \text{ psi } (2,73 \text{ kg/cm}^2). \quad (\text{Ec.31b/5})$$

Deducido lo anterior, y con los datos iniciales de Q, S_E, N_E, FT y Ft, poniendo la ecuación (Ec.16/5) en la forma:

$$Q / [N_E \times S_E \times \bar{K} a_m (\pi_{ar}) \times FT \times Ft] = P_a - \Delta \bar{P}_{ar} / 2 - P_p - \pi_a [(FR \times \bar{PC}) - (1 - \bar{R}_s)]$$

Y agrupando términos:

$$P_a = (Q / [N_E \times S_E \times \bar{K} a_m (\pi_{ar}) \times FT \times Ft]) + \pi_a [(FR \times \bar{PC}) - (1 - \bar{R}_s)] + \Delta \bar{P}_{ar} / 2 + P_p \quad (\text{Ec.32/5})$$

Obtendríamos la presión de alimentación P_a. En el caso de que el valor sea demasiado alto, repetiríamos el procedimiento, aumentando el número de módulos (N_m) y con este, el número de elementos de OI del sistema (N_E) o bien el tipo de elemento a considerar, eligiendo otro de mayor superficie de membrana (S_E), con el fin de reducir el valor de P_a.

Así p.e., consideremos los dos ejemplos anteriores aplicados al agua salobre de pozo, que constituye el agua de alimentación inicial de la planta de desalación, cuyos datos se aportan a este trabajo de tesis, y que según el apartado 4.2.4 del Capítulo IV, tiene una presión osmótica de 2,32 atm (2,4 kg/cm² <> 34,1 psi).

Adoptamos como elemento de OI a utilizar, el empleado en la planta, esto es, el BW30-8040.

Para el sistema de arreglo simple (1 etapa de desalación) constituido por 5

módulos en paralelo con 6 elementos BW30-8040 en serie c/u operando a una conversión del 50%, y para una producción del mismo de 600 m³/día (110 GPM). Obtendríamos:

$$N_E = 6 \times 5 = 30.$$

$$S_E = 330 \text{ ft}^2 \text{ (31 m}^2\text{)}.$$

$$\pi_a = 2,32 \text{ atm (2,4 kg/cm}^2 \text{ <> 34,1 psi)}.$$

Según la ecuación (Ec.29b/5):

$$\Delta \bar{P}_{ar} = 22,9 \text{ psi (1,6 kg/cm}^2 \text{ <> 1,65 atm)}.$$

Según la ecuación (Ec.24/5):

$$\pi_{ar} = 1,497 \times \pi_a = 1,497 \times 34,1 = 51 \text{ psi.} \quad (\text{Ec.33/5})$$

Al estar el valor de π_{ar} comprendido entre 25 y 200 psi, según la (Ec.18/5):

$$\begin{aligned} \bar{K} a_m (\pi_{ar}) &= 0,125 - [0,011(\pi_{ar} - 25)/35] = \\ &= 0,125 - [0,011(51 - 25)/35] = 0,117 \text{ galones / (ft}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{psi)}. \end{aligned}$$

Expresándolo su valor en m³ / (m²·dia·kg/cm²):

$$\bar{K} a_m (\pi_{ar}) = 0,117 \times (3,785/1000) / (0,0929 \times 0,0703) = 0,068 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{kg/cm}^2) \quad (\text{Ec.34/5})$$

Al ser la temperatura del agua de alimentación de 22°C. Según la (Ec.12b/5):

$$FT(\text{TCF}) = e^{3480((1/298) - (1/(273+T)))} = e^{3480((1/298) - (1/295))} = e^{-0,11867} = 0,888. \quad (\text{Ec.35/5})$$

El factor de corrección por tiempo de operación, según el apartado 5.4, será:

$$F_t = 1 \text{ (Puesta en marcha de la planta).}$$

Aplicando las ecuaciones (Ec.15/3) y (Ec.27/4), a este caso particular:

$$FR = (\ln(100/(100-R)) / (R/100)) = (\ln(100/50)) / 0,5 = 1,386. \quad (\text{Ec.36/5})$$

Según la (Ec.23/5): $\overline{PC} = 1,08$.

$\overline{R}_s = 0,99$ (Asumiendo un rechazo de sales del elemento de OI considerado del 99%, posición más desfavorable en este caso, según la tabla T-V/3.

Sustituyendo términos, la ecuación (Ec.16/5) quedaría como sigue:

$$\begin{aligned} P_a &= [600 / (30 \times 31 \times 0,068 \times 0,888 \times 1)] + 2,4[(1,386 \times 1,08) - (1 - 0,99)] + 1,6/2 + P_p = \\ &= 10,68 + 3,57 + 0,8 + P_p = 15,05 + P_p \end{aligned} \quad (\text{Ec.37/5})$$

De donde se deduce que:

$$(P_a - P_p) = 15,05 \text{ kg/cm}^2 \text{ (214 psi)}. \quad (\text{Ec.38/5})$$

El valor de la presión del permeado (P_p), depende del desnivel del depósito de equilibrio osmótico, con respecto a la cota media del sistema de OI. Para propósitos de cálculos previos, podemos considerar este en unos 3,5 m (5 psi). Obteniéndose:

$$P_a = 15,4 \text{ kg/cm}^2 \text{ (219 psi)}. \quad (\text{Ec.39/5})$$

Mientras que para el sistema de 2 etapas, con relación entre etapas 2:1 ($N_{m1e} = 2 \times N_{m2e}$). Constituido por 6 módulos, 4 de ellos en la primera etapa (N_{m1e}) y 2 en la segunda (N_{m2e}), con 6 elementos BW30-8040 en serie c/u operando a una conversión del 70%, y para una producción del mismo de 600 m³/día (110 GPM). Obtendríamos:

$$N_E = 6 \times 6 = 36.$$

$$S_E = 330 \text{ ft}^2 \text{ (31 m}^2\text{)}.$$

$$\pi_a = 2,32 \text{ atm } (2,4 \text{ kg/cm}^2 \leftrightarrow 34,1 \text{ psi}).$$

Según la ecuación (Ec.31b/5):

$$\Delta \bar{P}_{ar} = 38,8 \text{ psi } (2,7 \text{ kg/cm}^2 \leftrightarrow 2,58 \text{ atm}).$$

Según la ecuación (Ec.27/5):

$$\pi_{ar} = 1,84 \times \pi_a = 1,84 \times 34,1 = 62,7 \text{ psi.} \quad (\text{Ec.40/5})$$

Al estar el valor de π_{ar} comprendido entre 25 y 200 psi, según la (Ec.18/5):

$$\begin{aligned} \bar{K} a_m (\pi_{ar}) &= 0,125 - [0,011(\pi_{ar} - 25)/35] = 0,125 - [0,011(62,7 - 25)/35] = \\ &= 0,113 \text{ galones / (ft}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{psi)}. \end{aligned}$$

Expresándolo su valor en $\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{kg/cm}^2)$:

$$\bar{K} a_m (\pi_{ar}) = 0,113 \times (3,785/1000) / (0,0929 \times 0,0703) = 0,0655 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{kg/cm}^2). \quad (\text{Ec.41/5})$$

Al ser la temperatura del agua de alimentación de 22°C. Según la ecuación (Ec.12b/5):

$$FT(\text{TCF}) = e^{3480((1/298) - (1/(273+T)))} = e^{3480((1/298) - (1/295))} = e^{-0,11867} = 0,888. \quad (\text{Ec.42/5})$$

El factor de corrección por tiempo de operación, según el apartado 5.4, será:

$$F_t = 1 \text{ (Puesta en marcha de la planta).}$$

Aplicando las ecuaciones (Ec.15/3) y (Ec.27/4), a este caso particular:

$$FR = (\text{Ln}(100/(100-R))) / (R/100) = (\text{Ln}(100/30)) / 0,7 = 1,72. \quad (\text{Ec.43/5})$$

Según la (Ec.26a/5):

$$\overline{PC} = 1,07.$$

$\overline{R}_s = 0,99$ (Asumiendo un rechazo de sales del elemento de OI considerado del 99%, posición más desfavorable en este caso, según la tabla T-V/3).

Sustituyendo términos, la ecuación (Ec.16/5) en este caso, quedaría como sigue:

$$\begin{aligned} P_a &= [600 / (36 \times 31 \times 0,0655 \times 0,888 \times 1)] + 2,4[(1,72 \times 1,07) - (1 - 0,99)] + 2,7/2 + P_p = \\ &= 9,24 + 4,39 + 1,35 + P_p = 14,98 + P_p \end{aligned} \quad (\text{Ec.44/5})$$

De donde se deduce que:

$$(P_a - P_p) = 14,98 \text{ kg/cm}^2 \text{ (213 psi)}. \quad (\text{Ec.45/5})$$

El valor de la presión del permeado (P_p), depende del desnivel del depósito de equilibrio osmótico, con respecto a la cota media del sistema de OI. Para propósitos de cálculos previos podemos considerar este en unos 3,5 m (5 psi). Obteniéndose:

$$P_a = 15,33 \text{ kg/cm}^2 \text{ (218 psi)}. \quad (\text{Ec.46/5})$$

Observamos que, en los 2 ejemplos precedentes, las presiones de alimentación a los sistemas de OI son prácticamente idénticas. Ello se debe a que, aunque en el 2º caso se ha incrementado el número de elementos de OI, que han pasado de 30 a 36, sin embargo, este efecto queda contrarrestado, al pasar la recuperación del sistema del 50 al 70%, aumentándose con ello el factor de concentración de las sales y por tanto la presión osmótica media en el sistema, así como la caída de presión en el mismo.

Finalmente aplicando la ecuación (Ec.2/5) obtendríamos la calidad del agua producto para el sistema de OI definitivo.

Procediendo de una forma similar a la precedente, la ecuación anterior, referida al conjunto del sistema de OI y considerando los valores medios por elemento de OI, podemos escribirla de la siguiente forma práctica:

$$Q_j = \sum Q_{j_i} = \sum K_{j_i} \cdot C_{d_{j_i}} \cdot A_i = \sum K_{j_i} \cdot (C_{j_{ari}} - C_{j_{pi}}) \cdot A_i = N_E \times S_E \times \bar{K}_{j_m} \times FT \times (\bar{C}_{j_{ar}} - \bar{C}_{j_p}).$$

Despreciando \bar{C}_{j_p} frente a $\bar{C}_{j_{ar}}$:

$$Q_j = N_E \times S_E \times \bar{K}_{j_m} \times FT \times \bar{C}_{j_{ar}} :$$

Teniendo en cuenta el factor de recuperación del sistema de OI, ecuación (Ec.27/4) y la polarización de la concentración:

$$Q_j = N_E \cdot S_E \cdot \bar{K}_{j_m} \cdot FT \cdot C_{j_a} \cdot FR \cdot \bar{PC} \quad (Ec.47/5)$$

Siendo:

Q_j = Flujo del ión j a través de las membranas de los elementos del sistema de OI de la planta.

Q_{j_i} = Flujo del ión j a través de la membrana del elemento de OI i.

K_{j_i} = Coeficiente de permeabilidad al ión j, del elemento de OI i.

$C_{d_{j_i}}$ = Concentración diferencial del ión j a través de la membrana del elemento de OI i o diferencia de concentraciones del ión j entre los dos lados de la capa activa de la membrana de ese elemento.

A_i = Superficie de la membrana del elemento de OI i.

$C_{j_{ar}}$ = Concentración media del ión j en la corriente alimentación / rechazo sobre la superficie de la membrana del elemento de OI i, por el lado del concentrado.

$C_{j_{pi}}$ = Concentración media del ión j en la corriente de agua producto del elemento de OI i.

N_E = Número total de elementos del sistema de OI.

S_E = Superficie de membrana por elemento de OI.

\bar{K}_{jm} = Coeficiente de permeabilidad medio al ión j, del conjunto de elementos que constituyen el sistema de OI, a la temperatura de 25°C.

FT = Factor de corrección por temperatura.

$\bar{C}_{j_{ar}}$ = Valor medio de la concentración del ión j sobre la superficie de las membranas de los elementos del sistema OI, por el lado del concentrado.

\bar{C}_{j_p} = Valor medio de la concentración del ión j de las corrientes de productos de los elementos del sistema OI.

C_{j_a} = Concentración del ión j en la solución de alimentación al sistema de OI.

FR = Factor de recuperación del sistema de OI.

\bar{PC} = Valor medio de la polarización de la concentración de todos los elementos de OI del sistema.

Y dado que:

$$Q_j = Q \times C_{j_p} \quad (Ec.48/5)$$

Siendo:

C_{jp} = Concentración del ión j en la solución del agua producto del sistema de OI.

Por tanto, despejando C_{jp} en la ecuación anterior, y sustituyendo Q_j por su valor (Ec.47/5). Obtenemos:

$$C_{jp} = N_E \times S_E \times \bar{K}_{jm} \times FT \times C_{ja} \times FR \times \overline{PC} / Q \quad (Ec.49/5)$$

Y la concentración del agua producto del sistema de OI (C_p) será:

$$C_p = \sum C_{jp} \quad (Ec.50/5)$$

Ecuaciones en las que procederíamos a sustituir parámetros conocidos. Así, los coeficientes de permeabilidad medios a los distintos iones dependen de la membrana empleada y serían datos, normalmente, a proporcionar por el fabricante de la misma.

En nuestro caso, Filmtec Co, en su manual técnico indica, para sus membranas FT-30 de agua salobre (BW), y para algunas de las sales más comunes presentes en las aguas salobres a tratar en la región canaria, los rechazos de sales mostrados en la tabla adjunta (T-V/6), obtenidos bajo las siguientes condiciones estándar:

- Concentración de soluto: 2.000 ppm.
- Presión de alimentación: 16 kg/cm².
- pH alimentación: 7.

TABLA T-V/6

SOLUTO	PESO MOLECULAR	RECHAZO (%)
Fluoruro Sódico (NaF)	42	99
Cloruro Sódico (NaCl)	58	99
Sílice (SiO ₂) (50 ppm)	60	98
Bicarbonato Sódico (NaHCO ₃)	84	99
Nitrato Sódico (NaNO ₃)	85	97
Cloruro de Magnesio (MgCl ₂)	95	99
Cloruro Cálcico (CaCl ₂)	111	99
Sulfato de Magnesio (MgSO ₄)	120	>99
Sulfato de Cobre (CuSO ₄)	160	>99

De la que se observa que, como regla general, el rechazo de un soluto sube con la carga iónica y con el peso molecular del compuesto químico considerado.

Asimismo, recomienda adoptar como valor medio del coeficiente de permeabilidad a las sales totales disueltas (\bar{K}_{STDm}), para la mayoría de las aplicaciones de agua salobre, el valor de 0,4 galones/(pie²xdía) \leftrightarrow 0,0163 m/día, para cálculos previos aproximados.

Sin embargo, dado que su valor depende de la composición iónica del agua a tratar, y esta varía tanto en contenido como en peso de cada ión, dentro del conjunto de sales, de unas aguas a otras, el valor anterior resultará inadecuado.

Con objeto de obtener valores reales de los coeficientes de permeabilidad para cada ión específico, que sean de aplicación a nuestro caso de desalación de aguas salobres en la región canaria. Procedemos a continuación a aplicar la ecuación (Ec.49/5) a los datos prácticos obtenidos en este trabajo de tesis, e indicados en la tabla T-VII/3 (análisis muestras), apartado 7.2 del Capítulo VII. Considerando la muestra más representativa, que en este caso correspondería a la Nº 9 (apartado 7.3.3 del Capítulo VII), tomada a las 25.420 horas de operación, siendo la conversión de la planta del 54,1 %, la producción de 15,24 m³/h (365,76 m³/día) y la temperatura del agua de alimentación de 22° C .

De las características del sistema de OI, indicadas en el apartado 6.3.2, del Capítulo VI. Deducimos:

- $S_E = 31 \text{ m}^2$.
- $N_E = 20$.
- $Q = 365,76 \text{ m}^3/\text{día}$.

El factor de corrección por temperatura, ya ha sido calculado, y según la ecuación (Ec.35/5): $FT = 0,888$.

El factor de recuperación del sistema de OI, según las ecuaciones (Ec.15/3) y (Ec.27/4):

$$FR = [\text{Ln}(100/(100-R))] / (R/100) = [\text{Ln}(100/(100-54,1))] / (54,1 / 100) = 1,439. \quad (\text{Ec.51/5})$$

De las ecuaciones (Ec.9/5) y (Ec.21/5), deducimos:

$$\bar{R}_i = 1 - [1-(R/100)]^{1/n} = 1 - [1-(54,1/100)]^{1/8} = 0,093 \text{ (9,3\%)}. \quad (\text{Ec.52/5})$$

La polarización de la concentración media por elemento de OI del sistema sería entonces de:

$$\overline{PC} = e^{0,7 \bar{R}_i} = e^{0,7 \times 0,093} = 1,067. \quad (\text{Ec.53/5})$$

Sustituyendo valores en la ecuación (Ec.49/5), obtenemos para cada ión j el correspondiente valor del coeficiente de permeabilidad medio, a la temperatura de 25° C,

\bar{K}_{jm} :

$$\bar{K}_{jm} = 365,76 \times (C_{jp} / C_{ja}) / (20 \times 31 \times 0,888 \times 1,439 \times 1,067). \quad (\text{Ec.54/5})$$

Siendo: $C_{jp} / C_{ja} = P_j / 100$.

En la que P_j , es el paso del ión j en %.

Por tanto:

$$\bar{K}_{j_m} = 365,76 \times P_j / (100 \times 20 \times 31 \times 0,888 \times 1,439 \times 1,067).$$

Esto es:

$$\bar{K}_{j_m} = 0,4327 \times P_j / 100 \text{ m/día.} \quad (\text{Ec.55/5})$$

Los resultados de los coeficientes de permeabilidad a los distintos iones, referidos a la temperatura de 25° C, para la muestra analizada, se indican en la tabla T-V/7:

TABLA T-V/7

ION	RECHAZO (%)	PASO (%)	\bar{K}_{j_m} (m/día)
Ca	99,30	0,7	0,00303
Mg	99,44	0,56	0,00242
Na	97,30	2,7	0,01117
K	96,30	3,7	0,01600
HCO ₃	98,61	1,39	0,00601
SO ₄	99,93	0,07	0,00030
NO ₃	90,34	9,66	0,04707
Cl	98,13	1,87	0,00809
SiO ₂	99,41	0,59	0,00255
STD	97,72	2,28	0,00987

De la que se deduce que, el coeficiente de permeabilidad a las sales totales disueltas (STD), para esta muestra y tipo de agua de alimentación, es de 0,00987. Oscilando los valores específicos entre 0,04707 (NO₃)⁻ y 0,00034 (SO₄)²⁻. Ya que, según se deduce de las ecuaciones anteriores, y de la evolución frente al tiempo de operación del paso de sales normalizado, como puede apreciarse en el gráfico de la figura VII/9, apartado 7.3.4 del Capítulo VII, los coeficientes de permeabilidad son prácticamente independientes del tiempo de operación de la planta. Adoptamos los valores obtenidos y reflejados en la tabla anterior.

Consideramos a continuación los dos ejemplos ya tratados, aplicados al agua salobre de pozo, que constituye el agua de alimentación inicial de la planta, y cuya composición iónica se refleja en la tabla adjunta:

TABLA T-V/8

ION	CONCENTRACIÓN (mg/l)
Ca ²⁺	96,1
Mg ²⁺	139,7
Na ⁺	955,0
K ⁺	32,3
(HCO ₃) ⁻	668,7
(SO ₄) ²⁻	695,2
(NO ₃) ⁻	382,5
Cl ⁻	963,0
SiO ₂	35,0
STD	3.968,0

Para el sistema de arreglo simple (1 etapa de desalación). Constituido por 5 módulos en paralelo con 6 elementos BW30-8040 en serie c/u operando a una conversión del 50%, y para una producción del mismo de 600 m³/día. Siendo:

$$N_E = 6 \times 5 = 30.$$

$$S_E = 31 \text{ m}^2.$$

$$FT = 0,888.$$

$$FR = 1,386.$$

$$\overline{PC} = 1,08.$$

Sustituyendo valores en la ecuación (Ec.49/5):

$$C_{jp} = 30 \times 31 \times \bar{K} j_m \times 0,888 \times C_{ja} \times 1,386 \times 1,08 / 600$$

$$C_{jp} = 2,06 \times \bar{K} j_m \times C_{ja} \quad (Ec.56/5)$$

Obtendríamos, para cada uno de los iones, la concentración esperada en el agua producto de la planta (Tabla T-V/9).

TABLA T-V/9

ION	ALIMENTACIÓN (mg/l)	$\bar{K} j_m$ (m/día)	PRODUCTO (mg/l)
Ca ²⁺	96,1	0,00303	0,6
Mg ²⁺	139,7	0,00242	0,7
Na ⁺	955	0,01117	22
K ⁺	32,3	0,01600	1,1
(HCO ₃) ⁻	668,7	0,00601	8,3
(SO ₄) ²⁻	695,2	0,00030	0,5
(NO ₃) ⁻	382,5	0,04707	37,1
Cl ⁻	963	0,00809	16,1
SiO ₂	35	0,00255	0,2
STD	3.968	-	86,6

Para el sistema de dos arreglos (2 etapas de desalación). Constituido por 6 módulos en disposición 2:1, con 6 elementos BW30-8040 en serie c/u operando a una conversión del 70%, y para una producción del mismo de 600 m³/día. Siendo:

$$N_E = 6 \times 6 = 36.$$

$$S_E = 31 \text{ m}^2.$$

$$FT = 0,888.$$

$$FR = 1,72.$$

$$\bar{PC} = 1,07.$$

Sustituyendo valores en la ecuación (Ec.49/5):

$$C_{jp} = 36 \times 31 \times \bar{K} j_m \times 0,888 \times C_{ja} \times 1,72 \times 1,07 / 600$$

$$C_{jp} = 3,04 \times \bar{K} j_m \times C_{ja} \quad (Ec.57/5)$$

Obtendríamos, para cada uno de los iones, la concentración esperada en el agua producto de la planta (Tabla T-V/10).

TABLA T-V/10

ION	ALIMENTACIÓN (mg/l)	$\bar{K} j_m$ (m/día)	PRODUCTO (mg/l)
Ca ²⁺	96,1	0,00303	0,9
Mg ²⁺	139,7	0,00242	1,1
Na ⁺	955	0,01117	32,5
K ⁺	32,3	0,01600	1,6
(HCO ₃) ⁻	668,7	0,00601	12,3
(SO ₄) ²⁻	695,2	0,00030	0,7
(NO ₃) ⁻	382,5	0,04707	54,8
Cl ⁻	963	0,00809	23,7
SiO ₂	35	0,00255	0,3
STD	3.968	-	127,9

De acuerdo a lo indicado en el Capítulo III (Ecuaciones Ec.11/3 y Ec.16/3), teniendo en cuenta que el nivel de anhídrido carbónico esperado en la corriente de alimentación (apartado 3.4.7 del mencionado capítulo), es de:

$$(CO_2)_a = (CO_2)_p = 17,3 \text{ mg/l.}$$

Caben esperar unos valores de pH en las aguas productos de:

Para el primer caso (Tabla V/9):

$$pH_p = 6,3 + \log([HCO_3]_p / (CO_2)_p) = 6,3 + \log(8,3 \times 0,819 / 17,3).$$

$$\text{pH}_p = 6,3 - 0,4 = 5,9.$$

Para el segundo caso (Tabla V/10):

$$\text{pH}_p = 6,3 + \log([\text{HCO}_3]_p/(\text{CO}_2)_p) = 6,3 + \log(12,3 \times 0,819/17,3).$$

$$\text{pH}_p = 6,3 - 0,24 = 6,06.$$

5.5.6.- Filosofía del diseño propuesto.

La filosofía del diseño se muestra gráficamente a través de las figuras (F-V/22-1 a F-V/22-8), complementarias del procedimiento seguido.

Los valores contemplados en el gráfico de la figura F-V/22-2 se han deducido a partir de los valores límites de los flujos de alimentación (máximo), rechazo (mínimo) y producto (máximo), así como de la recuperación máxima, indicados en la tabla T-V/1. Y de la producciones medias por elemento/módulo/etapa/sistema (Figura F-V/5).

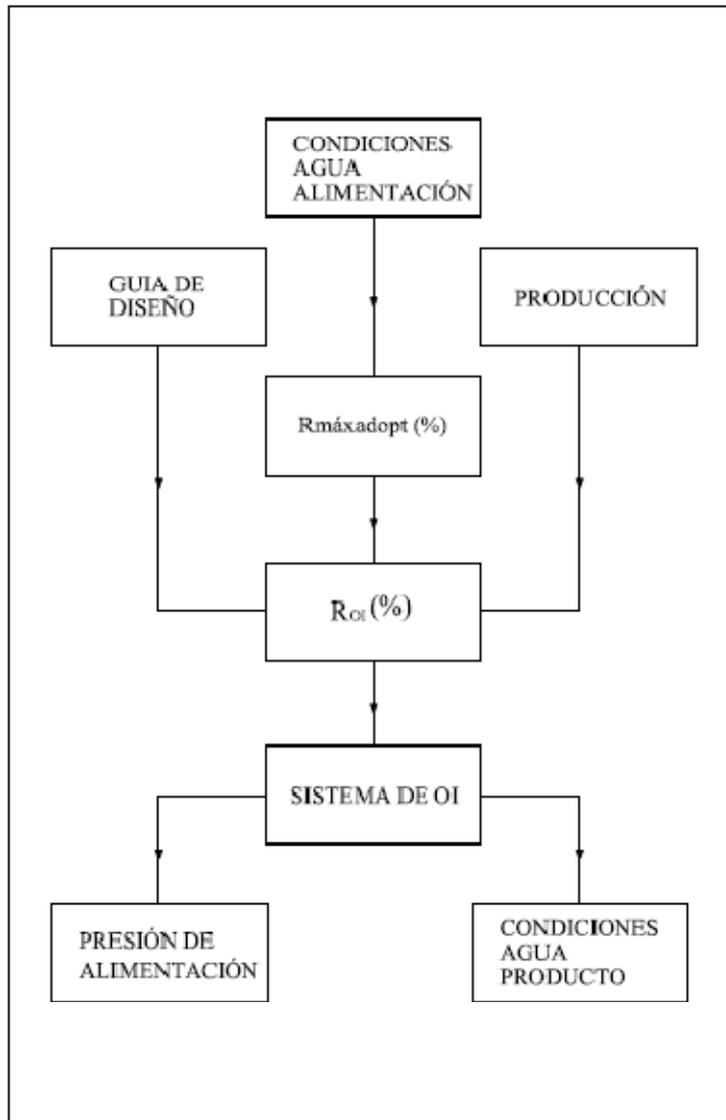


FIGURA F-V/22-1

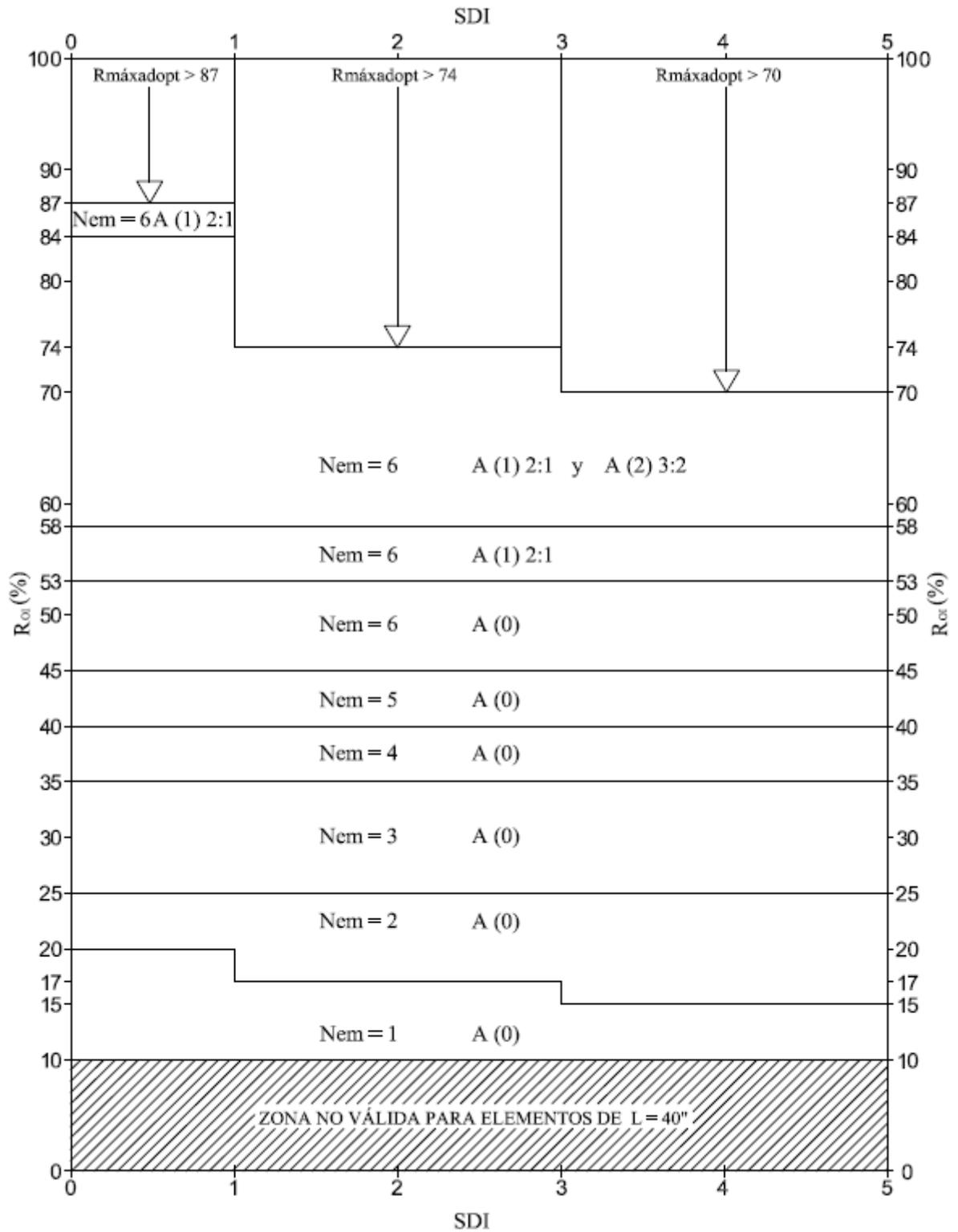


FIGURA F-V/22-2

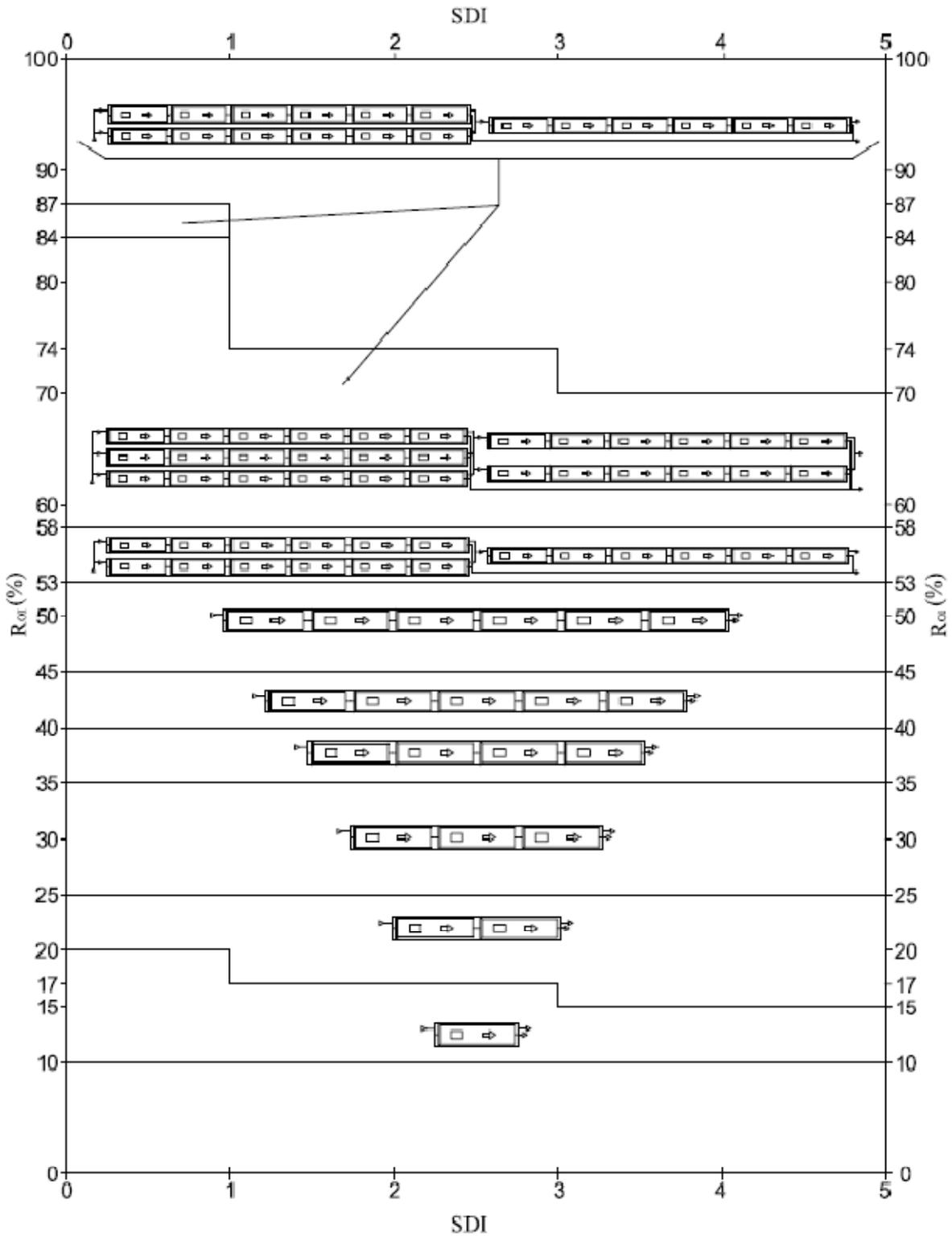


FIGURA F-V/22-3

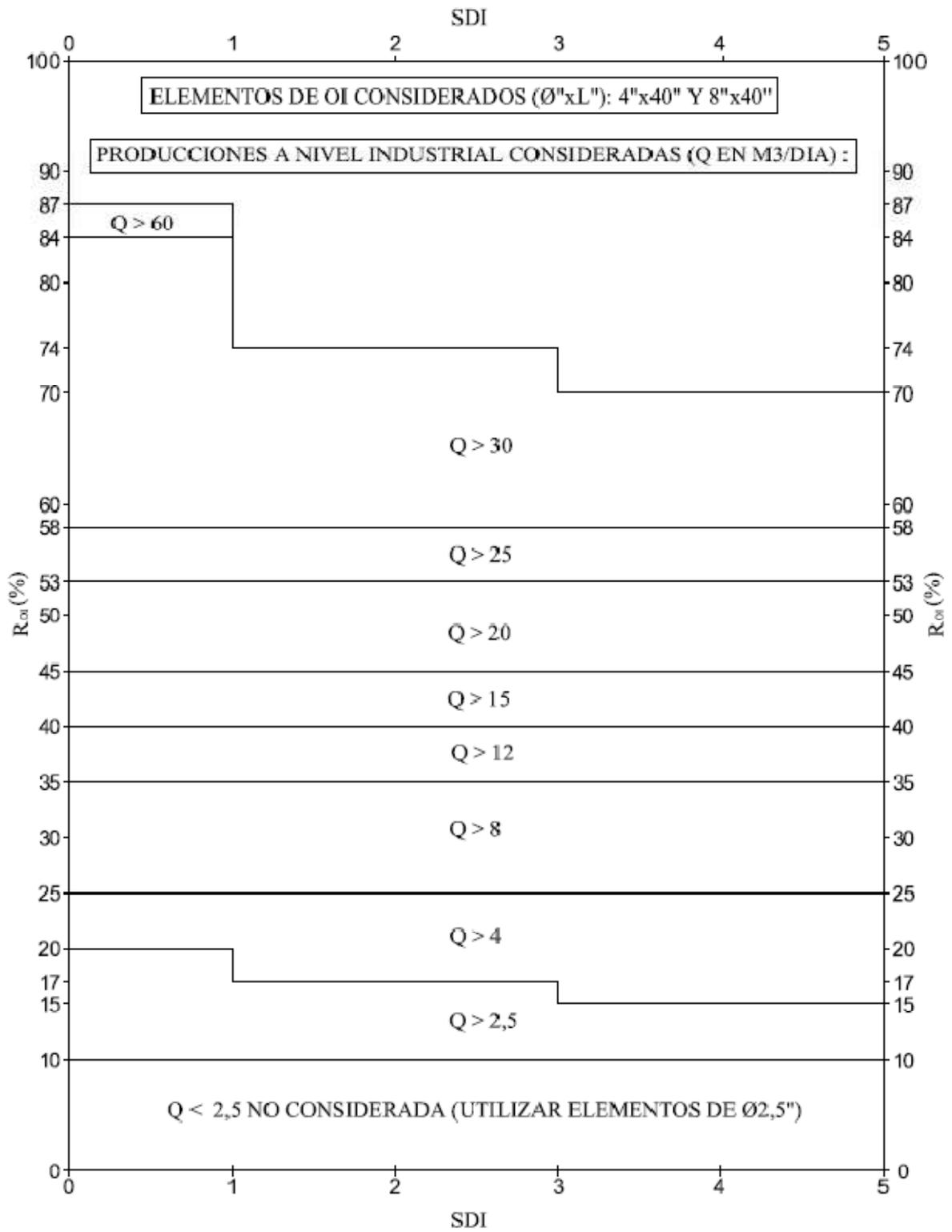


FIGURA F-V/22-4

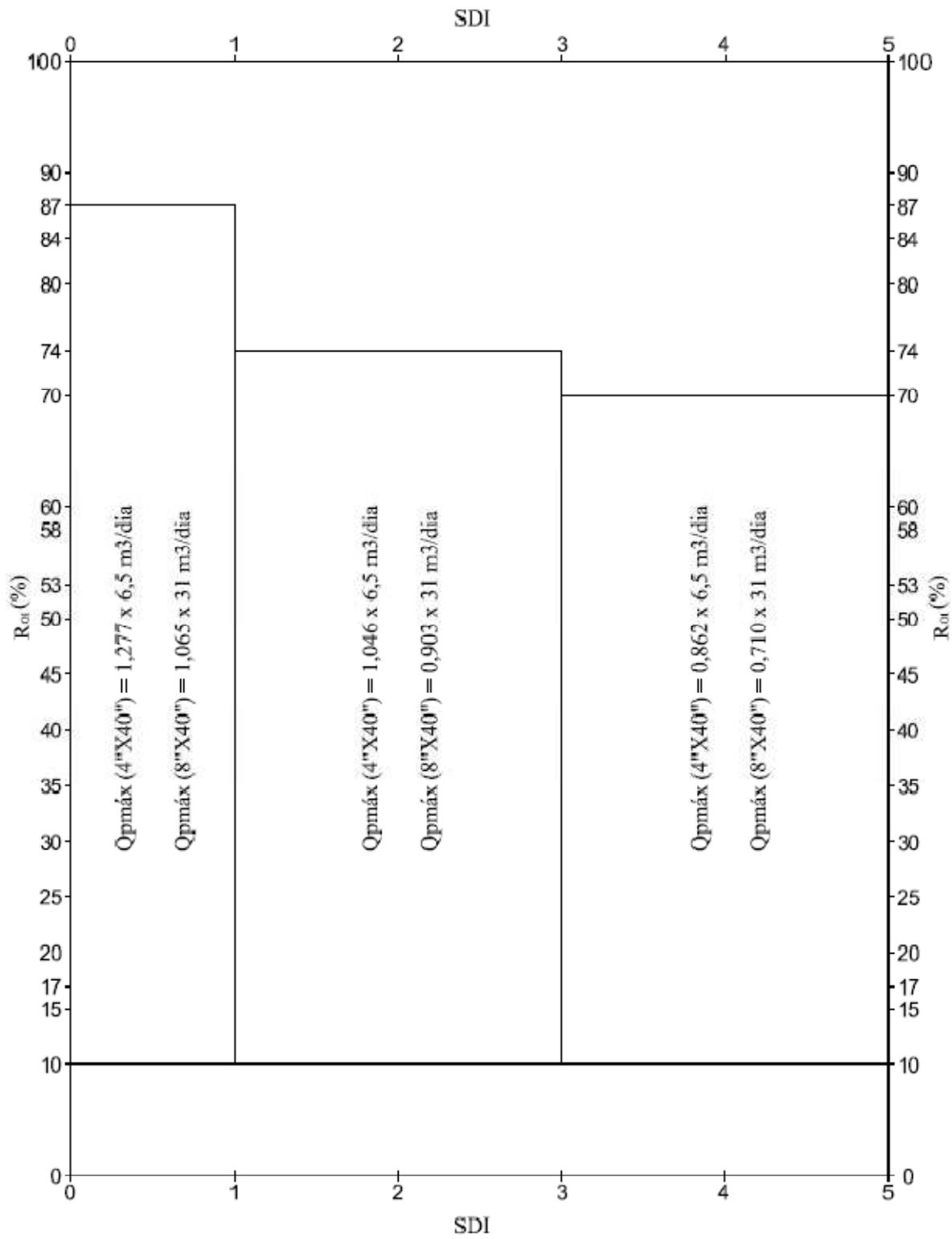


FIGURA F-V/22-5

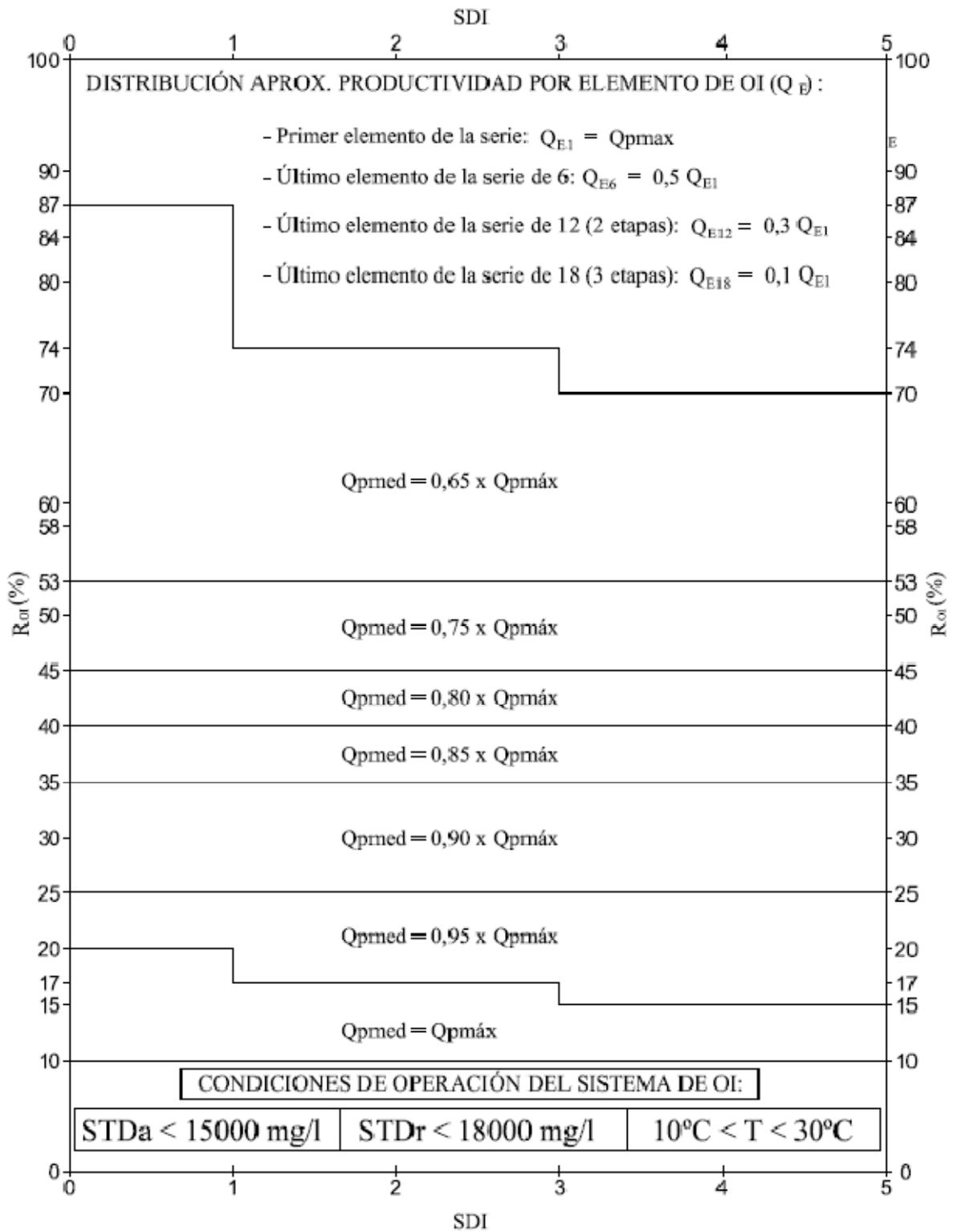


FIGURA F-V/22-6

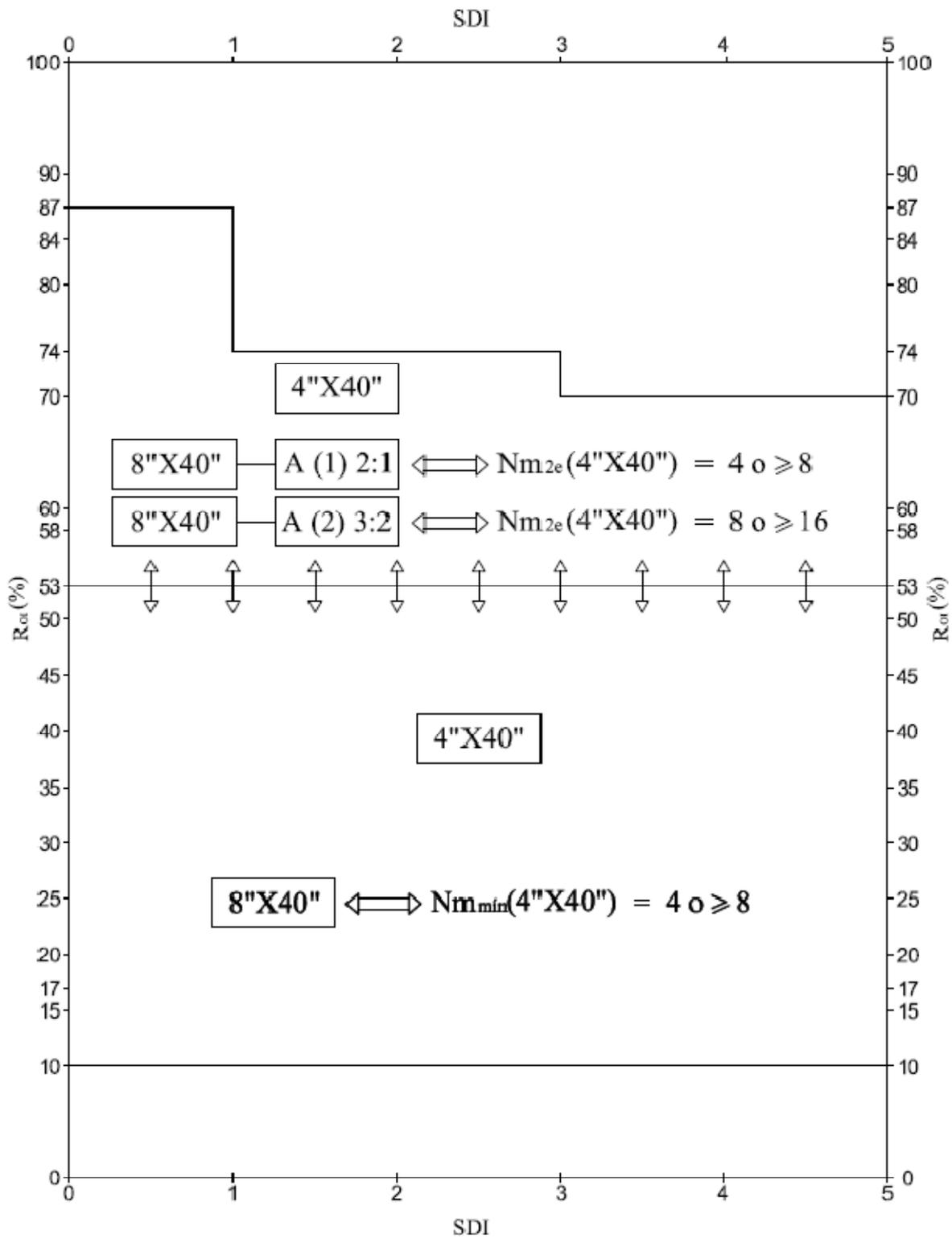


FIGURA F-V/22-7

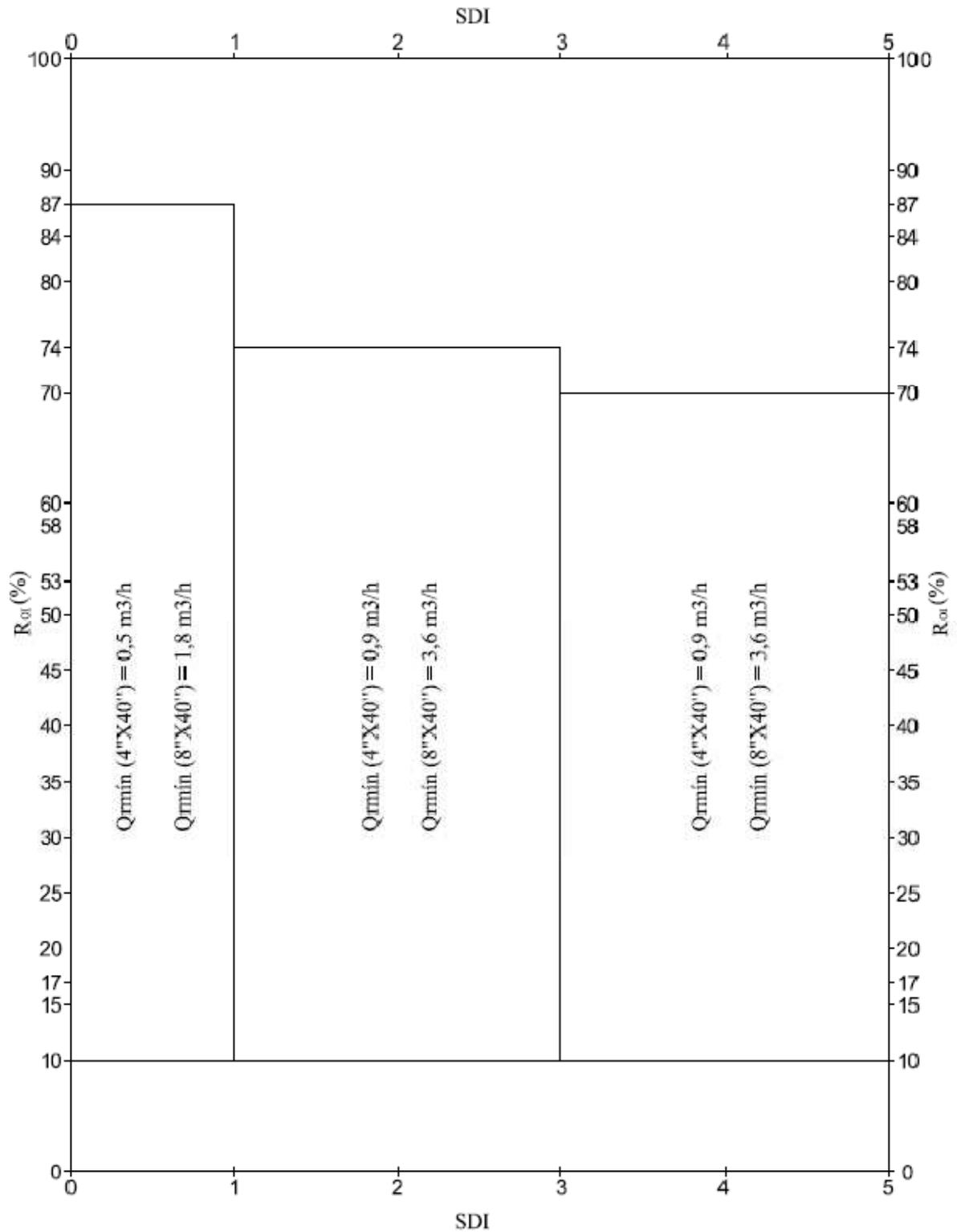


FIGURA F-V/22-8

5.5.7.- Procedimiento de diseño.

Seguiremos el siguiente orden secuencial:

1º) Datos de partida.

2º) Cálculos iniciales.

3º) Cálculo del nivel máximo de recuperación del sistema de OI para que no haya incrustación de Sílice ($R1 = R_{\text{máx-SiO}_2}$).

4º) Cálculo del nivel máximo de recuperación del sistema de OI a adoptar ($R_{\text{máx-adopt}}$).

4-1) Cálculo del nivel máximo de recuperación del sistema de OI para que, no habiendo incrustación de sílice, no haya incrustación de Carbonato Cálcico ($R2 = R_{\text{máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3}$).

4-2) Cálculo del nivel máximo de recuperación del sistema de OI para que, no habiendo incrustación de Sílice y Carbonato Cálcico, no haya incrustación de Sulfato Cálcico ($R3 = R_{\text{máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4}$).

4-3) Cálculo del nivel máximo de recuperación del sistema de OI para que, no habiendo incrustación de Sílice, Carbonato Cálcico y Sulfato Cálcico, no haya incrustación de Sulfato de Bario ($R4 = R_{\text{máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4}$).

4-4) Cálculo del nivel máximo de recuperación del sistema de OI para que, no habiendo incrustación de Sílice, Carbonato Cálcico, Sulfato Cálcico y Sulfato de Bario, no haya incrustación de Sulfato de Estroncio ($R5 = R_{\text{máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4\text{-SrSO}_4}$).

4-5) Cálculo del nivel máximo de recuperación del sistema de OI para que, no habiendo incrustación de Sílice, Carbonato Cálcico, Sulfato Cálcico, Sulfato de Bario y Sulfato de Estroncio, no haya incrustación de Fluoruro Cálcico ($R_{\text{máxadopt}} = R6 = R_{\text{máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4\text{-SrSO}_4\text{-CaF}_2}$).

4-6) Otros tipos de incrustación.

5º) Arreglo del Sistema de OI. Condiciones de partida. Conversión del sistema de OI (R_{OI}).

6º) Elección del elemento a utilizar para el diseño del sistema de OI.

7º) N° de elementos de OI, y N° de módulos de OI a utilizar.

8º) Comprobaciones y ajustes del sistema de OI.

9º) Cálculo de la presión osmótica del agua de alimentación.

10º) Considerar el factor de temperatura.

11º) Considerar el factor de tiempo de operación.

12º) Cálculo de la recuperación media por elemento de OI (\bar{R}_i):

13º) Cálculo de la polarización de la concentración media por elemento de OI (\bar{PC}).

14º) Cálculo del factor de recuperación del sistema de OI (FR).

15º) Cálculo de la presión osmótica de la concentración media alimentación-rechazo del sistema de OI (π_{ar}).

16º) Cálculo del coeficiente de permeabilidad al agua medio del sistema de OI ($\bar{K} a_m (T)$)

en galones / (ft².día.psi) (*).

17º) Indicar el coeficiente de permeabilidad al agua medio del sistema de OI ($\bar{K} a_m$ (T)) en m³ / (m².dia.kg/cm²).

18º) Calcular la caída de presión alimentación – rechazo, del sistema de OI ($\Delta \bar{P}_{ar}$) en kg/cm².

19º) Calcular la presión de alimentación del sistema de OI (P_a) en kg/cm².

20º) Calcular la calidad esperada del agua producto del sistema de OI.

(*): Comoquiera que las ecuaciones empíricas para la determinación del coeficiente de permeabilidad al agua de la membrana, aportadas por el fabricante de la misma (*Ec.17/5*, *Ec.18/5* y *Ec.19/5*), vienen expresadas en estas unidades, que por otro lado aportan una mejor visión y comprensión de sus límites de aplicación, hemos procedido a realizar los cálculos en estas unidades en primer lugar, indicando posteriormente los valores en el SI de unidades.

El procedimiento seguido se ha incluido en el Anexo 1. Como programa de cálculo se ha utilizado el MATLAB\®2008a.

5.5.8.- Aplicación práctica. Simulaciones.

Se han realizado cuatro simulaciones representativas de aguas salobres, las 2 primeras corresponden al agua de alimentación de la planta considerada en este trabajo de tesis (600 y 400 m³/día), situada en el Norte de Gran Canaria.

En la tercera (500 m³/día) hemos tomado el agua de alimentación de una planta actualmente en operación, situada como las anteriores en la isla de Gran Canaria y en la zona del suroeste de la misma. Mientras que la cuarta simulación (300 m³/día), el agua a tratar procede de un pozo de toma situado en el sureste de la isla de Fuerteventura.

5.5.8.1.- Simulación 1 (600 m³/día).

***** Datos de entrada *****

Cationes en mg/l: Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Bario, Estroncio.

(Ca) _a	96.10
(Mg) _a	139.70
(Na) _a	955.00
(K) _a	32.30
(Ba) _a	0.00
(Sr) _a	0.00

/*****/

Aniones en mg/l: Carbonatos (0 mg/l), Bicarbonatos, Sulfatos, Nitratos, Cloruros, Fluoruros.

(CO ₃) _a	0.00
(HCO ₃) _a	668.70

(SO ₄) _a	695.20
(NO ₃) _a	382.50
(Cl) _a	963.00
(F) _a	0.00

/*****/

Otros en mg/l: Cloro (0 mg/l), Sílice, Hierro, Manganeso y Aluminio.

(Cl ₂) _a	0.00
(SiO ₂) _a	35.00
(Fe) _a	0.10
(Mn) _a	0.00
(Al) _a	0.00

/*****/

Otros datos de entrada.

pH _a (<8)	7.80
T _{mín} (≥10°C)	22.0
T _{med} (°C)	22.0
T _{máx} (≤30°C)	22.0
SDI(<5)	2.70
Q(m ³ /día)	600.00
Q _p (m ³ /h)	25.00

/*****/

***** Datos de salida *****

Comprobación del balance iónico.

(meq/Cationes) _a	58.64
-----------------------------	-------

(meq/Aniones)_a 58.78

Des-ion -0.14

Tras el balance iónico:

(Na)_a 958.27

(Cl)_a 963.00

(STD)_a 3970.77

/*****/

Presión osmótica del agua de alimentación.

$\pi_a (T_{\min})$ (kg/cm²) 2.39

$\pi_a (T_{\text{med}})$ (kg/cm²) 2.39

$\pi_a (T_{\max})$ (kg/cm²) 2.39

/*****/

Valor de $R_{\text{máx-adopt}}$ para que no se prevean incrustaciones de: sílice, carbonato cálcico, sulfatos y fluoruro cálcico.

$R_{\text{máx-adopt}}$ 67.47

Incrustación de hierro no evaluada. Consultar fabricante anti-incrustante específico.

/*****/

Recuperación del sistema de OI.

Recuperación del sistema de OI con elementos de 4":

Nº de etapas de desalación: 2

Recuperación del sistema de OI con elementos de 4" en arreglo 2:1:

$R_{\text{OI-4}} (2:1)$ 67.00

Recuperación del sistema de OI con elementos de 4" en arreglo 3:2:

R_{OI-4} (3:2) 67.00

Recuperación del sistema de OI con elementos de 8":

Nº de etapas de desalación: 2

Recuperación del sistema de OI con elementos de 8" en arreglo 2:1:

R_{OI-8} (2:1) 67.00

Recuperación del sistema de OI con elementos de 4" en arreglo 3:2:

R_{OI-8} (3:2) 0.00

/*****/

Número de elementos por módulo del sistema de OI.

Número de elementos por módulo de 4":

Número de elementos por módulo de 4" en arreglo 2:1:

N_{Em-4} (2:1) 6

Número de elementos por módulo de 4" en arreglo 3:2:

N_{Em-4} (3:2) 6

Número de elementos por módulo de 8":

Número de elementos por módulo de 8" en arreglo 2:1:

N_{Em-8} (2:1) 6

Número de elementos por módulo de 8" en arreglo 3:2:

N_{Em-8} (3:2) 0

/*****/

Número de módulos del sistema de OI.

Número de módulos de 4":

Número de módulos de 4" en arreglo 2:1:

N_{m-4} (2:1) 24

Número de módulos de 4" en arreglo 3:2:

N_{m-4} (3:2) 25

Número de módulos de 8":

Número de módulos de 8" en arreglo 2:1:

N_{m-8} (2:1) 6

Número de módulos de 8" en arreglo 3:2:

N_{m-8} (3:2) 0

/*****/

Número de módulos de la primera etapa del sistema de OI.

Número de módulos de la primera etapa de 4":

Número de módulos de la primera etapa de 4" en arreglo 2:1:

N_{m-1e-4} (2:1) 16

Número de módulos de la primera etapa de 4" en arreglo 3:2:

N_{m-1e-4} (3:2) 15

Número de módulos de la primera etapa de 8":

Número de módulos de la primera etapa de 8" en arreglo 2:1:

N_{m-1e-8} (2:1) 4

Número de módulos de la primera etapa de 8" en arreglo 3:2:

N_{m-1e-8} (3:2) 0

/*****/

Número de módulos de la segunda etapa del sistema de OI.

Número de módulos de la segunda etapa de 4":

Número de módulos de la segunda etapa de 4" en arreglo 2:1:

N_{m-2e-4} (2:1) 8

Número de módulos de la segunda etapa de 4" en arreglo 3:2:

N_{m-2e-4} (3:2) 10

Número de módulos de la segunda etapa de 8":

Número de módulos de la segunda etapa de 8" en arreglo 2:1:

N_{m-2e-8} (2:1) 2

Número de módulos de la segunda etapa de 8" en arreglo 3:2:

N_{m-2e-8} (3:2) 0

/*****/

Número de elementos del sistema de OI.

Número de elementos de 4":

Número de elementos de 4" en arreglo 2:1:

N_{E-4} (2:1) 144

Número de elementos de 4" en arreglo 3:2:

N_{E-4} (3:2) 150

Número de elementos de 8":

Número de elementos de 8" en arreglo 2:1:

N_{E-8} (2:1) 36

Número de elementos de 8" en arreglo 3:2:

N_{E-8} (3:2) 0

/*****/

Presión de alimentación estándar (3 años) en kg/cm^2 .

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 4" y $S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", $6,5 \text{ m}^2$, en arreglo 2:1:

$$P_{a\text{-est-4-6,5}} (2:1) \quad 19.56$$

Para el sistema de Ol equipado con elementos de 4", 6,5 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a\text{-est-4-6,5}} (3:2) \quad 18.86$$

Para los sistemas de Ol equipados con elementos de 4" y $S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$:

Para el sistema de Ol equipado con elementos de 4", 7,25 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a\text{-est-4-7,25}} (2:1) \quad 18.15$$

Para el sistema de Ol equipado con elementos de 4", 7,25 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a\text{-est-4-7,25}} (3:2) \quad 17.51$$

Para los sistemas de Ol equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$:

Para el sistema de Ol equipado con elementos de 8", 31 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a\text{-est-8-31}} (2:1) \quad 17.44$$

Para el sistema de Ol equipado con elementos de 8", 31 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a\text{-est-8-31}} (3:2) \quad 0$$

Para los sistemas de Ol equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 34 \text{ m}^2$:

Para el sistema de Ol equipado con elementos de 8", 34 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a\text{-est-8-34}} (2:1) \quad 16.43$$

Para el sistema de Ol equipado con elementos de 8", 34 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a\text{-est-8-34}} (3:2) \quad 0$$

Para los sistemas de Ol equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 37 \text{ m}^2$:

Para el sistema de Ol equipado con elementos de 8", 37 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a\text{-est-8-37}} (2:1) \quad 15.58$$

Para el sistema de Ol equipado con elementos de 8", 37 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a\text{-est-8-37}} (3:2) \quad 0$$

Para los sistemas de Ol equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 41 \text{ m}^2$:

Para el sistema de Ol equipado con elementos de 8", 41 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a\text{-est-8-41}} (2:1) \quad 14.65$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 41 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a\text{-est-8-41}} (3:2) \quad 0$$

/*****/

Presión de alimentación máxima (5 años) en kg/cm².

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 4" y S_{E-4} = 6,5 m²:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", 6,5 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a\text{-máx-4-6,5}} (2:1) \quad 21.51$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", 6,5 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a\text{-máx-4-6,5}} (3:2) \quad 20.73$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 4" y S_{E-4} = 7,25 m²:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", 7,25 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a\text{-máx-4-7,25}} (2:1) \quad 19.90$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", 7,25 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a\text{-máx-4-7,25}} (3:2) \quad 19.19$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y S_{E-8} = 31 m²:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 31 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a\text{-máx-8-31}} (2:1) \quad 19.07$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 31 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a\text{-máx-8-31}} (3:2) \quad 0$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y S_{E-8} = 34 m²:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 34 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a\text{-máx-8-34}} (2:1) \quad 17.92$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 34 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a\text{-máx-8-34}} (3:2) \quad 0$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y S_{E-8} = 37 m²:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 37 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a-\text{máx-8-37}} (2:1) = 16.95$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 37 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a-\text{máx-8-37}} (3:2) = 0$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y S_{E-8} = 41 m²:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 41 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a-\text{máx-8-41}} (2:1) = 15.88$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 41 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a-\text{máx-8-41}} (3:2) = 0$$

/*****/

Calidad del agua producto estándar (T_{med}).

Concentraciones en mg/l.

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 4"

Ión (mg/l)	S _{E-4} = 6,5 m ²		S _{E-4} = 7,25 m ²	
	Arreglo 2:1	Arreglo 3:2	Arreglo 2:1	Arreglo 3:2
Ca ²⁺	0.71	0.74	0.79	0.82
Mg ²⁺	0.82	0.86	0.92	0.96
Na ⁺	26.10	27.19	29.11	30.32
K ⁺	1.26	1.31	1.41	1.46
Ba ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃ ⁻	9.80	10.21	10.93	11.39
SO ₄ ²⁻	0.51	0.53	0.57	0.59
NO ₃ ⁻	43.90	45.73	48.97	51.01
Cl ⁻	19.00	19.79	21.19	22.07
F ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	0.22	0.23	0.24	0.25
STD	102.32	106.58	114.12	118.88
pH	5.97	5.98	6.01	6.03

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8”:

Ión	$S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$		$S_{E-8} = 34 \text{ m}^2$		$S_{E-4} = 37 \text{ m}^2$		$S_{E-4} = 41 \text{ m}^2$	
	A. 2:1	A. 3:2						
(mg/l)								
Ca ²⁺	0.85	0.00	0.93	0.00	1.01	0.00	1.12	0.00
Mg ²⁺	0.98	0.00	1.08	0.00	1.17	0.00	1.30	0.00
Na ⁺	31.12	0.00	34.13	0.00	37.14	0.00	41.16	0.00
K ⁺	1.50	0.00	1.65	0.00	1.79	0.00	1.99	0.00
Ba ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃ ⁻	11.68	0.00	12.81	0.00	13.95	0.00	15.45	0.00
SO ₄ ²⁻	0.61	0.00	0.67	0.00	0.72	0.00	0.80	0.00
NO ₃ ⁻	52.34	0.00	57.41	0.00	62.47	0.00	69.23	0.00
Cl ⁻	22.65	0.00	24.84	0.00	27.03	0.00	29.96	0.00
F ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	0.26	0.00	0.28	0.00	0.31	0.00	0.34	0.00
STD	121.99	0.00	133.80	0.00	145.61	0.00	161.35	0.00
pH	6.04	0.00	6.08	0.00	6.12	0.00	6.16	0.00

/******

Calidad del agua producto desfavorable ($T_{\text{máx}}$).

Se omite por ser idéntica a la calidad estándar, ya que en este caso:

$$T_{\text{med}} = T_{\text{máx}} = 22^{\circ}\text{C}.$$

/******

5.5.8.2.- Simulación 2 (400 m³/día).

***** Datos de entrada *****

Cationes en mg/l: Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Bario, Estroncio.

(Ca) _a	96.10
(Mg) _a	139.70
(Na) _a	955.00
(K) _a	32.30
(Ba) _a	0.00
(Sr) _a	0.00

/*****/

Aniones en mg/l: Carbonatos (0 mg/l), Bicarbonatos, Sulfatos, Nitratos, Cloruros, Fluoruros.

(CO ₃) _a	0.00
(HCO ₃) _a	668.70
(SO ₄) _a	695.20
(NO ₃) _a	382.50
(Cl) _a	963.00
(F) _a	0.00

/*****/

Otros en mg/l: Cloro (0 mg/l), Sílice, Hierro, Manganeso y Aluminio.

(Cl ₂) _a	0.00
(SiO ₂) _a	35.00
(Fe) _a	0.10

(Mn)_a 0.00

(Al)_a 0.00

/*****/

Otros datos de entrada.

pH_a(<8) 7.80

T_{mín}(≥10°C) 22.0

T_{med}(°C) 22.0

T_{máx}(≤30°C) 22.0

SDI(<5) 2.70

Q(m³/día) 400.00

Q_p(m³/h) 16.67

/*****/

***** Datos de salida *****

Comprobación del balance iónico.

(meq/Cationes)_a 58.64

(meq/Aniones)_a 58.78

Des-ion -0.14

Tras el balance iónico:

(Na)_a 958.27

(Cl)_a 963.00

(STD)_a 3970.77

/*****/

Presión osmótica del agua de alimentación.

$$\pi_a (T_{\min}) \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad 2.39$$

$$\pi_a (T_{\text{med}}) \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad 2.39$$

$$\pi_a (T_{\max}) \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad 2.39$$

/*****/

Valor de $R_{\text{máx-adopt}}$ para que no se prevean incrustaciones de: sílice, carbonato cálcico, sulfatos y fluoruro cálcico.

$$R_{\text{máx-adopt}} \quad 67.47$$

Incrustación de hierro no evaluada. Consultar fabricante anti-incrustante específico.

/*****/

Recuperación del sistema de OI.

Recuperación del sistema de OI con elementos de 4":

Nº de etapas de desalación: 2

Recuperación del sistema de OI con elementos de 4" en arreglo 2:1:

$$R_{\text{OI-4 (2:1)}} \quad 67.00$$

Recuperación del sistema de OI con elementos de 4" en arreglo 3:2:

$$R_{\text{OI-4 (3:2)}} \quad 67.00$$

Recuperación del sistema de OI con elementos de 8":

Nº de etapas de desalación: 2

Recuperación del sistema de OI con elementos de 8" en arreglo 2:1:

$$R_{\text{OI-8 (2:1)}} \quad 0.00$$

Recuperación del sistema de OI con elementos de 8" en arreglo 3:2:

$$R_{\text{OI-8 (3:2)}} \quad 67.00$$

/*******/

Número de elementos por módulo del sistema de OI.

Número de elementos por módulo de 4”:

Número de elementos por módulo de 4” en arreglo 2:1:

$N_{Em-4} (2:1) \quad 6$

Número de elementos por módulo de 4” en arreglo 3:2:

$N_{Em-4} (3:2) \quad 6$

Número de elementos por módulo de 8”:

Número de elementos por módulo de 8” en arreglo 2:1:

$N_{Em-8} (2:1) \quad 0$

Número de elementos por módulo de 8” en arreglo 3:2:

$N_{Em-8} (3:2) \quad 6$

/*******/

Número de módulos del sistema de OI.

Número de módulos de 4”:

Número de módulos de 4” en arreglo 2:1:

$N_{m-4} (2:1) \quad 18$

Número de módulos de 4” en arreglo 3:2:

$N_{m-4} (3:2) \quad 20$

Número de módulos de 8”:

Número de módulos de 8” en arreglo 2:1:

$N_{m-8} (2:1) \quad 0$

Número de módulos de 8” en arreglo 3:2:

$N_{m-8} (3:2) \quad 5$

/*****/

Número de módulos de la primera etapa del sistema de OI.

Número de módulos de la primera etapa de 4”:

Número de módulos de la primera etapa de 4” en arreglo 2:1:

$N_{m-1e-4} (2:1)$ 12

Número de módulos de la primera etapa de 4” en arreglo 3:2:

$N_{m-1e-4} (3:2)$ 12

Número de módulos de la primera etapa de 8”:

Número de módulos de la primera etapa de 8” en arreglo 2:1:

$N_{m-1e-8} (2:1)$ 0

Número de módulos de la primera etapa de 8” en arreglo 3:2:

$N_{m-1e-8} (3:2)$ 3

/*****/

Número de módulos de la segunda etapa del sistema de OI.

Número de módulos de la segunda etapa de 4”:

Número de módulos de la segunda etapa de 4” en arreglo 2:1:

$N_{m-2e-4} (2:1)$ 6

Número de módulos de la segunda etapa de 4” en arreglo 3:2:

$N_{m-2e-4} (3:2)$ 8

Número de módulos de la segunda etapa de 8”:

Número de módulos de la segunda etapa de 8” en arreglo 2:1:

$N_{m-2e-8} (2:1)$ 0

Número de módulos de la segunda etapa de 8” en arreglo 3:2:

$N_{m-2e-8} (3:2)$ 2

/*****/

Número de elementos del sistema de OI.

Número de elementos de 4":

Número de elementos de 4" en arreglo 2:1:

$N_{E-4} (2:1) \quad 108$

Número de elementos de 4" en arreglo 3:2:

$N_{E-4} (3:2) \quad 120$

Número de elementos de 8":

Número de elementos de 8" en arreglo 2:1:

$N_{E-8} (2:1) \quad 0$

Número de elementos de 8" en arreglo 3:2:

$N_{E-8} (3:2) \quad 30$

/*****/

Presión de alimentación estándar (3 años) en kg/cm^2 .

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 4" y $S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", $6,5 \text{ m}^2$, en arreglo 2:1:

$P_{a\text{-est-4-6,5}} (2:1) \quad 17.79$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", $6,5 \text{ m}^2$, en arreglo 3:2:

$P_{a\text{-est-4-6,5}} (3:2) \quad 16.35$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 4" y $S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", $7,25 \text{ m}^2$, en arreglo 2:1:

$P_{a\text{-est-4-7,25}} (2:1) \quad 16.54$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", $7,25 \text{ m}^2$, en arreglo 3:2:

$P_{a\text{-est-4-7,25}} (3:2) \quad 15.22$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 31 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a-est-8-31} (2:1) \quad 0$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 31 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a-est-8-31} (3:2) \quad 14.64$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y S_{E-8} = 34 m²:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 34 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a-est-8-34} (2:1) \quad 0$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 34 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a-est-8-34} (3:2) \quad 13.83$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y S_{E-8} = 37 m²:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 37 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a-est-8-37} (2:1) \quad 0$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 37 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a-est-8-37} (3:2) \quad 13.16$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y S_{E-8} = 41 m²:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 41 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a-est-8-41} (2:1) \quad 0$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 41 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a-est-8-41} (3:2) \quad 12.41$$

/*****/

Presión de alimentación máxima (5 años) en kg/cm².

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 4" y S_{E-4} = 6,5 m²:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", 6,5 m², en arreglo 2:1:

$$P_{a-máx-4-6,5} (2:1) \quad 19.53$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", 6,5 m², en arreglo 3:2:

$$P_{a-\text{máx-4-6,5}} (3:2) \quad 17.91$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 4" y $S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", $7,25 \text{ m}^2$, en arreglo 2:1:

$$P_{a-\text{máx-4-7,25}} (2:1) \quad 18.09$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", $7,25 \text{ m}^2$, en arreglo 3:2:

$$P_{a-\text{máx-4-7,25}} (3:2) \quad 16.62$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 31 m^2 , en arreglo 2:1:

$$P_{a-\text{máx-8-31}} (2:1) \quad 0$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 31 m^2 , en arreglo 3:2:

$$P_{a-\text{máx-8-31}} (3:2) \quad 15.95$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 34 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 34 m^2 , en arreglo 2:1:

$$P_{a-\text{máx-8-34}} (2:1) \quad 0$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 34 m^2 , en arreglo 3:2:

$$P_{a-\text{máx-8-34}} (3:2) \quad 15.03$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 37 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 37 m^2 , en arreglo 2:1:

$$P_{a-\text{máx-8-37}} (2:1) \quad 0$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 37 m^2 , en arreglo 3:2:

$$P_{a-\text{máx-8-37}} (3:2) \quad 14.25$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 41 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 41 m^2 , en arreglo 2:1:

$$P_{a-\text{máx-8-41}} (2:1) \quad 0$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 41 m^2 , en arreglo 3:2:

$$P_{a-\text{máx-8-41}} (3:2) \quad 13.40$$

/*****/

Calidad del agua producto estándar (T_{med}).

Concentraciones en mg/l.

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 4":

Ión (mg/l)	$S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$		$S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$	
	Arreglo 2:1	Arreglo 3:2	Arreglo 2:1	Arreglo 3:2
Ca^{2+}	0.80	0.89	0.89	0.99
Mg^{2+}	0.93	1.03	1.03	1.15
Na^+	29.36	32.63	32.75	36.39
K^+	1.42	1.58	1.58	1.76
Ba^{2+}	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr^{2+}	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO_3^-	11.02	12.25	12.30	13.66
SO_4^{2-}	0.57	0.64	0.64	0.71
NO_3^-	49.39	54.88	55.09	61.21
Cl^-	21.37	23.75	23.84	26.49
F^-	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO_2	0.24	0.27	0.27	0.30
STD	115.11	127.90	128.39	142.66
pH	6.02	6.06	6.06	6.11

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8":

Ión (mg/l)	$S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$		$S_{E-8} = 34 \text{ m}^2$		$S_{E-4} = 37 \text{ m}^2$		$S_{E-4} = 41 \text{ m}^2$	
	A. 2:1	A. 3:2						
Ca^{2+}	0.00	1.06	0.00	1.16	0.00	1.26	0.00	1.40
Mg^{2+}	0.00	1.23	0.00	1.35	0.00	1.47	0.00	1.62
Na^+	0.00	38.90	0.00	42.66	0.00	46.43	0.00	51.45
K^+	0.00	1.88	0.00	2.06	0.00	2.24	0.00	2.48
Ba^{2+}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr^{2+}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO_3^-	0.00	14.61	0.00	16.02	0.00	17.43	0.00	19.32

SO ₄ ²⁻	0.00	0.76	0.00	0.83	0.00	0.90	0.00	1.00
NO ₃ ⁻	0.00	65.43	0.00	71.76	0.00	78.09	0.00	86.54
Cl ⁻	0.00	28.31	0.00	31.05	0.00	33.79	0.00	37.45
F ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	0.00	0.32	0.00	0.36	0.00	0.39	0.00	0.43
STD	0.00	152.49	0.00	167.25	0.00	182.01	0.00	201.69
pH	0.00	6.14	0.00	6.18	0.00	6.22	0.00	6.26

/*****/

Calidad del agua producto desfavorable (T_{máx}).

Se omite por ser idéntica a la calidad estándar, ya que en este caso:

$$T_{med} = T_{máx} = 22^{\circ}\text{C}.$$

/*****/

5.5.8.3.- Simulación 3 (500 m³/día).

***** Datos de entrada *****

Cationes en mg/l: Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Bario, Estroncio.

(Ca) _a	681.50
(Mg) _a	489.10
(Na) _a	400.00
(K) _a	26.30
(Ba) _a	0.00
(Sr) _a	0.00

/*****/

Aniones en mg/l: Carbonatos (0 mg/l), Bicarbonatos, Sulfatos, Nitratos, Cloruros, Fluoruros.

(CO ₃) _a	0.00
(HCO ₃) _a	74.30
(SO ₄) _a	573.50
(NO ₃) _a	115.10
(Cl) _a	2760.50
(F) _a	0.00

/*****/

Otros en mg/l: Cloro (0 mg/l), Sílice, Hierro, Manganeso y Aluminio.

(Cl ₂) _a	0.00
(SiO ₂) _a	22.50
(Fe) _a	0.10
(Mn) _a	0.00
(Al) _a	0.00

/*****/

Otros datos de entrada.

pH _a (<8)	6.90
T _{min} (≥10°C)	22.0
T _{med} (°C)	23.0
T _{máx} (≤30°C)	24.0
SDI(<5)	2.50
Q(m ³ /día)	500.00
Q _p (m ³ /h)	20.83

/*****/

***** Datos de salida *****

Comprobación del balance iónico.

(meq/Cationes) _a	92.31
(meq/Aniones) _a	92.89
Des-ion	-0.58

Tras el balance iónico:

(Na) _a	413.34
(Cl) _a	2760.50
(STD) _a	5156.14

/*****/

Presión osmótica del agua de alimentación.

$\pi_a (T_{\min})$ (kg/cm ²)	3.33
$\pi_a (T_{\text{med}})$ (kg/cm ²)	3.34
$\pi_a (T_{\max})$ (kg/cm ²)	3.35

/*****/

Valor de $R_{\text{máx-adopt}}$ para que no se prevean incrustaciones de: sílice, carbonato cálcico, sulfatos y fluoruro cálcico.

$R_{\text{máx-adopt}}$	74.43
------------------------	-------

Incrustación de hierro no evaluada. Consultar fabricante anti-incrustante específico.

/*****/

Recuperación del sistema de OI.

Recuperación del sistema de OI con elementos de 4":

Nº de etapas de desalación: 2

Recuperación del sistema de OI con elementos de 4" en arreglo 2:1:

$R_{OI-4} (2:1)$ 71.00

Recuperación del sistema de OI con elementos de 4" en arreglo 3:2:

$R_{OI-4} (3:2)$ 71.00

Recuperación del sistema de OI con elementos de 8":

Nº de etapas de desalación: 2

Recuperación del sistema de OI con elementos de 8" en arreglo 2:1:

$R_{OI-8} (2:1)$ 0.00

Recuperación del sistema de OI con elementos de 8" en arreglo 3:2:

$R_{OI-8} (3:2)$ 71.00

/*****/

Número de elementos por módulo del sistema de OI.

Número de elementos por módulo de 4":

Número de elementos por módulo de 4" en arreglo 2:1:

$N_{Em-4} (2:1)$ 6

Número de elementos por módulo de 4" en arreglo 3:2:

$N_{Em-4} (3:2)$ 6

Número de elementos por módulo de 8":

Número de elementos por módulo de 8" en arreglo 2:1:

$N_{Em-8} (2:1)$ 0

Número de elementos por módulo de 8" en arreglo 3:2:

$N_{Em-8} (3:2)$ 6

/*****/

Número de módulos del sistema de OI.

Número de módulos de 4”:

Número de módulos de 4” en arreglo 2:1:

$N_{m-4} (2:1)$ 21

Número de módulos de 4” en arreglo 3:2:

$N_{m-4} (3:2)$ 20

Número de módulos de 8”:

Número de módulos de 8” en arreglo 2:1:

$N_{m-8} (2:1)$ 0

Número de módulos de 8” en arreglo 3:2:

$N_{m-8} (3:2)$ 5

/*****/

Número de módulos de la primera etapa del sistema de OI.

Número de módulos de la primera etapa de 4”:

Número de módulos de la primera etapa de 4” en arreglo 2:1:

$N_{m-1e-4} (2:1)$ 14

Número de módulos de la primera etapa de 4” en arreglo 3:2:

$N_{m-1e-4} (3:2)$ 12

Número de módulos de la primera etapa de 8”:

Número de módulos de la primera etapa de 8” en arreglo 2:1:

$N_{m-1e-8} (2:1)$ 0

Número de módulos de la primera etapa de 8” en arreglo 3:2:

$N_{m-1e-8} (3:2)$ 3

/*****/

Número de módulos de la segunda etapa del sistema de OI.

Número de módulos de la segunda etapa de 4”:

Número de módulos de la segunda etapa de 4” en arreglo 2:1:

$N_{m-2e-4} (2:1)$ 7

Número de módulos de la segunda etapa de 4” en arreglo 3:2:

$N_{m-2e-4} (3:2)$ 8

Número de módulos de la segunda etapa de 8”:

Número de módulos de la segunda etapa de 8” en arreglo 2:1:

$N_{m-2e-8} (2:1)$ 0

Número de módulos de la segunda etapa de 8” en arreglo 3:2:

$N_{m-2e-8} (3:2)$ 2

/*****/

Número de elementos del sistema de OI.

Número de elementos de 4”:

Número de elementos de 4” en arreglo 2:1:

$N_{E-4} (2:1)$ 126

Número de elementos de 4” en arreglo 3:2:

$N_{E-4} (3:2)$ 120

Número de elementos de 8”:

Número de elementos de 8” en arreglo 2:1:

$N_{E-8} (2:1)$ 0

Número de elementos de 8” en arreglo 3:2:

$N_{E-8} (3:2)$ 30

/*****/

Presión de alimentación estándar (3 años) en kg/cm².

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 4" y $S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", $6,5 \text{ m}^2$, en arreglo 2:1:

$$P_{a\text{-est-4-6,5}} (2:1) \quad 21.28$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", $6,5 \text{ m}^2$, en arreglo 3:2:

$$P_{a\text{-est-4-6,5}} (3:2) \quad 22.00$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 4" y $S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", $7,25 \text{ m}^2$, en arreglo 2:1:

$$P_{a\text{-est-4-7,25}} (2:1) \quad 19.88$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", $7,25 \text{ m}^2$, en arreglo 3:2:

$$P_{a\text{-est-4-7,25}} (3:2) \quad 20.53$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 31 m^2 , en arreglo 2:1:

$$P_{a\text{-est-8-31}} (2:1) \quad 0$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 31 m^2 , en arreglo 3:2:

$$P_{a\text{-est-8-31}} (3:2) \quad 19.77$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 34 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 34 m^2 , en arreglo 2:1:

$$P_{a\text{-est-8-34}} (2:1) \quad 0$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 34 m^2 , en arreglo 3:2:

$$P_{a\text{-est-8-34}} (3:2) \quad 18.72$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 37 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 37 m^2 , en arreglo 2:1:

$$P_{a\text{-est-8-37}} (2:1) \quad 0$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 37 m^2 , en arreglo 3:2:

$P_{a\text{-est-8-37}}$ (3:2) 17.83

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 41 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 41 m^2 , en arreglo 2:1:

$P_{a\text{-est-8-41}}$ (2:1) 0

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 41 m^2 , en arreglo 3:2:

$P_{a\text{-est-8-41}}$ (3:2) 16.86

/*****/

Presión de alimentación máxima (5 años) en kg/cm^2 .

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 4" y $S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos

de 4", $6,5 \text{ m}^2$, en arreglo 2:1:

$P_{a\text{-máx-4-6,5}}$ (2:1) 23.81

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", $6,5 \text{ m}^2$, en arreglo 3:2:

$P_{a\text{-máx-4-6,5}}$ (3:2) 24.66

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 4" y $S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", $7,25 \text{ m}^2$, en arreglo 2:1:

$P_{a\text{-máx-4-7,25}}$ (2:1) 22.15

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", $7,25 \text{ m}^2$, en arreglo 3:2:

$P_{a\text{-máx-4-7,25}}$ (3:2) 22.91

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 31 m^2 , en arreglo 2:1:

$P_{a\text{-máx-8-31}}$ (2:1) 0

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 31 m^2 , en arreglo 3:2:

$P_{a\text{-máx-8-31}}$ (3:2) 22.00

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 34 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 34 m^2 , en arreglo 2:1:

$$P_{a-\text{máx-8-34}} (2:1) = 0$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 34 m^2 , en arreglo 3:2:

$$P_{a-\text{máx-8-34}} (3:2) = 20.75$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 37 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 37 m^2 , en arreglo 2:1:

$$P_{a-\text{máx-8-37}} (2:1) = 0$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 37 m^2 , en arreglo 3:2:

$$P_{a-\text{máx-8-37}} (3:2) = 19.70$$

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8" Y $S_{E-8} = 41 \text{ m}^2$:

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 41 m^2 , en arreglo 2:1:

$$P_{a-\text{máx-8-41}} (2:1) = 0$$

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 41 m^2 , en arreglo 3:2:

$$P_{a-\text{máx-8-41}} (3:2) = 18.54$$

/*****/

Calidad del agua producto estándar (T_{med}).

Concentraciones en mg/l.

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 4":

Ión (mg/l)	$S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$		$S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$	
	Arreglo 2:1	Arreglo 3:2	Arreglo 2:1	Arreglo 3:2
Ca^{2+}	5.84	5.56	6.51	6.20
Mg^{2+}	3.35	3.19	3.73	3.55
Na^+	13.05	12.43	14.56	13.86
K^+	1.19	1.13	1.33	1.26

Ba ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃ ⁻	1.26	1.20	1.41	1.34
SO ₄ ²⁻	0.49	0.46	0.54	0.52
NO ₃ ⁻	15.31	14.58	17.08	16.27
Cl ⁻	63.12	60.12	70.41	67.06
F ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	0.16	0.15	0.18	0.17
STD	103.77	98.83	115.74	110.23
pH	5.13	5.11	5.18	5.16

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8":

Ión (mg/l)	S _{E-8} = 31 m ²		S _{E-8} = 34 m ²		S _{E-4} = 37 m ²		S _{E-4} = 41 m ²	
	A. 2:1	A. 3:2						
Ca ²⁺	0.00	6.63	0.00	7.27	0.00	7.91	0.00	8.77
Mg ²⁺	0.00	3.80	0.00	4.17	0.00	4.53	0.00	5.02
Na ⁺	0.00	14.82	0.00	16.25	0.00	17.69	0.00	19.60
K ⁺	0.00	1.35	0.00	1.48	0.00	1.61	0.00	1.79
Ba ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃ ⁻	0.00	1.43	0.00	1.57	0.00	1.71	0.00	1.90
SO ₄ ²⁻	0.00	0.55	0.00	0.61	0.00	0.66	0.00	0.73
NO ₃ ⁻	0.00	17.39	0.00	19.07	0.00	20.76	0.00	23.00
Cl ⁻	0.00	71.68	0.00	78.62	0.00	85.55	0.00	94.80
F ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	0.00	0.18	0.00	0.20	0.00	0.22	0.00	0.24
STD	0.00	117.84	0.00	129.24	0.00	140.64	0.00	155.85
pH	0.00	5.19	0.00	5.23	0.00	5.26	0.00	5.31

/*****/

Calidad del agua producto desfavorable (T_{máx}).

Concentraciones en mg/l.

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 4":

Ión (mg/l)	$S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$		$S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$	
	Arreglo 2:1	Arreglo 3:2	Arreglo 2:1	Arreglo 3:2
Ca ²⁺	6.07	5.78	6.77	6.45
Mg ²⁺	3.48	3.31	3.88	3.70
Na ⁺	13.58	12.93	15.14	14.42
K ⁺	1.24	1.18	1.38	1.31
Ba ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃ ⁻	1.31	1.25	1.46	1.39
SO ₄ ²⁻	0.51	0.48	0.56	0.54
NO ₃ ⁻	15.93	15.17	17.77	16.92
Cl ⁻	65.67	62.55	73.25	69.76
F ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	0.17	0.16	0.19	0.18
STD	107.96	102.82	120.42	114.68
pH	5.15	5.13	5.19	5.17

Para los sistemas de OI equipados con elementos de 8":

Ión (mg/l)	$S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$		$S_{E-8} = 34 \text{ m}^2$		$S_{E-4} = 37 \text{ m}^2$		$S_{E-4} = 41 \text{ m}^2$	
	A. 2:1	A. 3:2						
Ca ²⁺	0.00	6.90	0.00	7.56	0.00	8.23	0.00	9.12
Mg ²⁺	0.00	3.95	0.00	4.33	0.00	4.72	0.00	5.23
Na ⁺	0.00	15.42	0.00	16.91	0.00	18.40	0.00	20.39
K ⁺	0.00	1.41	0.00	1.54	0.00	1.68	0.00	1.86
Ba ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃ ⁻	0.00	1.49	0.00	1.64	0.00	1.78	0.00	1.97
SO ₄ ²⁻	0.00	0.57	0.00	0.63	0.00	0.69	0.00	0.76
NO ₃ ⁻	0.00	18.09	0.00	19.84	0.00	21.59	0.00	23.93
Cl ⁻	0.00	74.57	0.00	81.79	0.00	89.01	0.00	98.63
F ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	0.00	0.19	0.00	0.21	0.00	0.23	0.00	0.25
STD	0.00	122.59	0.00	134.46	0.00	146.32	0.00	162.14
pH	0.00	5.20	0.00	5.24	0.00	5.28	0.00	5.32

/*****/

5.5.8.4.- Simulación 4 (300 m³/día).

***** Datos de entrada *****

Cationes en mg/l: Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Bario, Estroncio.

(Ca) _a	58.60
(Mg) _a	89.10
(Na) _a	2910.00
(K) _a	45.20
(Ba) _a	0.00
(Sr) _a	0.00

/*****/

Aniones en mg/l: Carbonatos (0 mg/l), Bicarbonatos, Sulfatos, Nitratos, Cloruros, Fluoruros.

(CO ₃) _a	0.00
(HCO ₃) _a	475.30
(SO ₄) _a	1063.40
(NO ₃) _a	21.50
(Cl) _a	3832.20
(F) _a	0.00

/*****/

Otros en mg/l: Cloro (0 mg/l), Sílice, Hierro, Manganeso y Aluminio.

(Cl ₂) _a	0.00
(SiO ₂) _a	25.20
(Fe) _a	0.20
(Mn) _a	0.00
(Al) _a	0.00

/*****/

Otros datos de entrada.

pH _a (<8)	7.70
T _{mín} (≥10°C)	24.0
T _{med} (°C)	25.0
T _{máx} (≤30°C)	26.0
SDI(<5)	2.60
Q(m ³ /día)	300.00
Q _p (m ³ /h)	12.50

/*****/

***** Datos de salida *****

Comprobación del balance iónico.

(meq/Cationes) _a	137.93
(meq/Aniones) _a	138.39
Des-ion	-0.45

Tras el balance iónico:

(Na) _a	2920.43
(Cl) _a	3832.20
(STD) _a	8530.93

/*****/

Presión osmótica del agua de alimentación.

$\pi_a (T_{\min})$ (kg/cm²) 6.14

$\pi_a (T_{\text{med}})$ (kg/cm²) 6.16

$\pi_a (T_{\max})$ (kg/cm²) 6.18

/*****/

Valor de $R_{\text{máx-adopt}}$ para que no se prevean incrustaciones de: sílice, carbonato cálcico, sulfatos y fluoruro cálcico.

$R_{\text{máx-adopt}}$ 79.45

Incrustación de hierro no evaluada. Consultar fabricante anti-incrustante específico.

/*****/

Recuperación del sistema de OI.

Recuperación del sistema de OI con elementos de 4":

Nº de etapas de desalación: 1

Recuperación del sistema de OI con elementos de 4":

$R_{\text{OI-4}}$ 52.00

Recuperación del sistema de OI con elementos de 8":

Nº de etapas de desalación: 1

Recuperación del sistema de OI con elementos de 8":

$R_{\text{OI-8}}$ 52.00

/******
/

Número de elementos por módulo del sistema de OI.

Número de elementos por módulo de 4":

N_{Em-4} 6

Número de elementos por módulo de 8":

N_{Em-8} 6

/******
/

Número de módulos del sistema de OI.

Número de módulos de 4":

N_{m-4} 10

Número de módulos de 8":

N_{m-8} 3

/******
/

Número de módulos de la primera etapa del sistema de OI.

Número de módulos de la primera etapa de 4":

Número de módulos de la primera etapa de 4" en arreglo 2:1:

N_{m-1e-4} (2:1) 0

Número de módulos de la primera etapa de 4" en arreglo 3:2:

N_{m-1e-4} (3:2) 0

Número de módulos de la primera etapa de 8":

Número de módulos de la primera etapa de 8" en arreglo 2:1:

N_{m-1e-8} (2:1) 0

Número de módulos de la primera etapa de 8" en arreglo 3:2:

N_{m-1e-8} (3:2) 0

/*****/

Número de módulos de la segunda etapa del sistema de OI.

Número de módulos de la segunda etapa de 4":

Número de módulos de la segunda etapa de 4" en arreglo 2:1:

N_{m-2e-4} (2:1) 0

Número de módulos de la segunda etapa de 4" en arreglo 3:2:

N_{m-2e-4} (3:2) 0

Número de módulos de la segunda etapa de 8":

Número de módulos de la segunda etapa de 8" en arreglo 2:1:

N_{m-2e-8} (2:1) 0

Número de módulos de la segunda etapa de 8" en arreglo 3:2:

N_{m-2e-8} (3:2) 0

/*****/

Número de elementos del sistema de OI.

Número de elementos de 4":

N_{E-4} 60

Número de elementos de 8":

N_{E-8} 18

/*****/

Presión de alimentación estándar (3 años) en kg/cm².

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", 6,5 m²:

P_{a-est-4-6,5} 28.69

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4":

P_{a-est-4-7,25} 26.80

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 31 m²:

P_{a-est-8-31} 23.03

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 34 m²:

P_{a-est-8-34} 21.90

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 37 m²:

P_{a-est-8-37} 20.96

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 41 m²:

P_{a-est-8-41} 19.91

/*****/

Presión de alimentación máxima (5 años) en kg/cm².

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", 6,5 m²:

P_{a-máx-4-6,5} 32.07

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4", 7,25 m²:

P_{a-máx-4-7,25} 29.83

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 31 m²:

P_{a-máx-8-31} 25.38

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 34 m²:

$P_{a\text{-máx-8-34}}$ 24.05

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 37 m²:

$P_{a\text{-máx-8-37}}$ 22.92

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8", 41 m²:

$P_{a\text{-máx-8-41}}$ 21.69

/*****/

Calidad del agua producto estándar (T_{med}).

Concentraciones en mg/l.

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4":

Ión (mg/l)	$S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$	$S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$
	Nº etapas:1	Nº etapas:1
Ca ²⁺	0.35	0.39
Mg ²⁺	0.43	0.48
Na ⁺	64.88	72.37
K ⁺	1.44	1.60
Ba ²⁺	0.00	0.00
Sr ²⁺	0.00	0.00
HCO ₃ ⁻	5.68	6.34
SO ₄ ²⁻	0.63	0.71
NO ₃ ⁻	2.01	2.25
Cl ⁻	61.66	68.78
F ⁻	0.00	0.00
SiO ₂	0.13	0.14
STD	137.22	153.05
pH	5.78	5.82

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8":

ión	$S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$	$S_{E-8} = 34 \text{ m}^2$	$S_{E-4} = 37 \text{ m}^2$	$S_{E-4} = 41 \text{ m}^2$
(mg/l)	Nº etapas:1	Nº etapas:1	Nº etapas:1	Nº etapas:1
Ca ²⁺	0.51	0.55	0.60	0.67
Mg ²⁺	0.61	0.67	0.73	0.81
Na ⁺	92.83	101.81	110.80	122.78
K ⁺	2.06	2.26	2.46	2.72
Ba ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃ ⁻	8.13	8.92	9.70	10.75
SO ₄ ²⁻	0.91	1.00	1.08	1.20
NO ₃ ⁻	2.88	3.16	3.44	3.81
Cl ⁻	88.22	96.76	105.30	116.68
F ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	0.18	0.20	0.22	0.24
STD	196.33	215.33	234.33	259.66
pH	5.93	5.97	6.01	6.05

/*****/

Calidad del agua producto desfavorable ($T_{\text{máx}}$).

Concentraciones en mg/l.

Para el sistema de OI equipado con elementos de 4”:

ión	$S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$	$S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$
(mg/l)	Nº etapas:1	Nº etapas:1
Ca ²⁺	0.36	0.41
Mg ²⁺	0.44	0.49
Na ⁺	66.83	74.54
K ⁺	1.48	1.65
Ba ²⁺	0.00	0.00
Sr ²⁺	0.00	0.00
HCO ₃ ⁻	5.85	6.53
SO ₄ ²⁻	0.65	0.73
NO ₃ ⁻	2.07	2.31

Cl ⁻	63.52	70.85
F ⁻	0.00	0.00
SiO ₂	0.13	0.15
STD	141.35	157.66
pH	5.79	5.84

Para el sistema de OI equipado con elementos de 8":

Ión	S _{E-8} = 31 m ²	S _{E-8} = 34 m ²	S _{E-4} = 37 m ²	S _{E-4} = 41 m ²
(mg/l)	Nº etapas:1	Nº etapas:1	Nº etapas:1	Nº etapas:1
Ca ²⁺	0.52	0.57	0.62	0.69
Mg ²⁺	0.63	0.69	0.75	0.84
Na ⁺	95.62	104.88	114.13	126.47
K ⁺	2.12	2.33	2.53	2.80
Ba ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃ ⁻	8.37	9.18	9.99	11.07
SO ₄ ²⁻	0.94	1.03	1.12	1.24
NO ₃ ⁻	2.97	3.25	3.54	3.92
Cl ⁻	90.88	99.67	108.47	120.19
F ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	0.19	0.21	0.22	0.25
STD	202.24	221.81	241.38	267.47
pH	5.95	5.99	6.02	6.07

/*****/

LISTA DE SIMBOLOS

a	= Alimentación.
A_m	= Superficie de la membrana m .
A_{mi}	= Superficie de la membrana del elemento de OI i .
A_i	= Superficie de la membrana del elemento de OI i .
BW	= Brackish Water.
C	= Parámetro de STD y T, del LSI para saturación del CaCO_3 .
C_a	= Concentración alimentación.
C_{ai}	= Concentración de la solución de alimentación al elemento i .
C_{ar}	= Concentración media alimentación-rechazo.
C_{dj}	= Concentración diferencial ión j en membrana del elemento i .
C_{ds_m}	= Concentración diferencial sal s en la membrana m .
c_i	= Concentración del ión i presente en el agua.
C_{ja}	= Concentración del ión/componente j en la alimentación.
$(C_j)_a$	= Ídem en mg/l.
$[C_j]_a$	= Ídem en ppm CaCO_3 .
$\overline{C}_{j_{ar}}$	= Concentración media alimentación/rechazo del ión j .
$C_{j_{ari}}$	= Ídem sobre la superficie del elemento de OI i .
C_{jp}	= Concentración del ión/componente j en el agua producto.
$(C_j)_p$	= Ídem en mg/l.
$[C_j]_p$	= Ídem en ppm CaCO_3 .
$C_{j_{pi}}$	= Concentración del ión j en el agua producto del elemento i .
C_{jr}	= Concentración del ión/componente j en el rechazo.
$(C_j)_r$	= Ídem en mg/l.
$[C_j]_r$	= Ídem en ppm CaCO_3 .
C_{mj}	= Concentración de soluto sobre la superficie del módulo j
C_p	= Concentración producto.
C_{pH}	= Coeficiente de pH de saturación de la SiO_2 .
C_{pi}	= Concentración de la solución de permeado del elemento i .
C_r	= Concentración rechazo.

F_a	= Flujo alimentación.
\bar{F}_{ar}	= Semisuma flujos alimentación y rechazo por módulo.
FC	= Factor de concentración.
FC _{máx}	= Factor de concentración máximo.
FC _{míni}	= Factor de concentración mínimo.
FC _{Ol}	= Factor de concentración del sistema de Ol.
FC _j	= Flujo medio concentrado módulo j.
FI _a	= Fuerza iónica del agua de alimentación.
FI _r	= Fuerza iónica del agua de rechazo.
F _p	= Flujo producto.
Fp _j	= Flujo producto módulo j.
F _r	= Flujo rechazo
FR	= Factor de recuperación.
FR _i	= Factor de recuperación del elemento i.
FT	= Factor de corrección por temperatura/Factor de temperatura.
Ft	= Factor de corrección por tiempo de operación.
Ka _m	= Coeficiente permeabilidad agua membrana m.
Ka _{mi}	= Coeficiente permeabilidad agua membrana elemento i.
K _{CaSO4r}	= Producto de solubilidad del sulfato cálcico del rechazo.
K _{BaSO4r}	= Producto de solubilidad del sulfato de bario del rechazo.
K _{SrSO4r}	= Producto de solubilidad del sulfato estroncio del rechazo.
$\bar{K} a_m$	= Coeficiente de permeabilidad medio al agua.
$\bar{K} a_m(T)$	= Ídem a la temperatura T.
K _j	= Coeficiente permeabilidad ión j del elemento i.
$\bar{K} j_m$	= Coeficiente permeabilidad medio al ión/componente j.
$\bar{K} j_m(T)$	= Ídem a la temperatura T.
Kp _j	= Coeficiente polarización módulo j.
Ks _m	= Coeficiente permeabilidad sal membrana m.
\bar{K}_{STDm}	= Coeficiente permeabilidad medio a las STD.
$\bar{K}_{STDm}(T)$	= Ídem a la temperatura T.
K _T	= Parámetro de T y FI, del S&DSI para saturación del CaCO ₃ .

LE	= Low Energy.
LP	= Low Pressure.
LSI	= Índice de saturación de Langelier.
m_i	= Concentración Molal / Molar del ión i en el agua.
$(m_i)_a$	= Concentración Molal / Molar del ión i en la alimentación.
$(m_i)_p$	= Concentración Molal / Molar del ión i en el producto.
$(m_i)_r$	= Concentración Molal / Molar del ión i en el rechazo.
MF	= Microfiltración.
n	= Número de elementos en serie por módulo y etapa.
N_E	= Número de elementos del sistema de OI.
N_{Em}	= Número de elementos por módulo del sistema de OI.
N_{Eini}	= Número inicial de elementos del sistema de OI.
$N_{E-ini-4}$	= Número inicial de elementos de Ø4", del sistema de OI.
$N_{E-ini-8}$	= Número inicial de elementos de Ø8", del sistema de OI.
N_{Emin}	= Número mínimo de elementos del sistema de OI.
NF	= Nanofiltración.
N_{mini}	= Número inicial de módulos del sistema de OI.
$N_{m-ini-4}$	= Número inicial de módulos de Ø4", del sistema de OI.
$N_{m-ini-8}$	= Número inicial de módulos de Ø8", del sistema de OI.
N_m	= Número de módulos del sistema de OI.
N_{m-4}	= Número de módulos de Ø4", del sistema de OI.
N_{m-8}	= Número de módulos de Ø8", del sistema de OI.
N_{m1e}	= Número de módulos 1ª etapa del sistema de OI.
N_{m-1e-4}	= Número de módulos Ø4", 1ª etapa del sistema de OI.
N_{m-1e-8}	= Número de módulos Ø8", 1ª etapa del sistema de OI.
N_{m2e}	= Número de módulos 2ª etapa del sistema de OI.
N_{m-2e-4}	= Número de módulos Ø4", 2ª etapa del sistema de OI.
N_{m-2e-8}	= Número de módulos Ø8", 2ª etapa del sistema de OI.
N_{m3e}	= Número de módulos 3ª etapa del sistema de OI.
OI	= Osmosis inversa.
P	= Presión.
p	= Producto.

PA	= Poliamida.
P_a	= Presión de alimentación del sistema de OI.
P_{a-est}	= Presión de alimentación estándar del sistema de OI.
$P_{a-máx}$	= Presión de alimentación máxima del sistema de OI.
P_{ai}	= Presión de alimentación del elemento i.
PC	= Polarización de la concentración.
\overline{PC}	= Polarización de la concentración media por elemento de OI.
PC_i	= Polarización de la concentración en el elemento i.
Pd_m	= Presión diferencial a través de la membrana m.
Pd_{mi}	= Presión diferencial a través de la membrana del elemento i.
P_{pi}	= Presión permeado elemento i.
p-Ca	= Parámetro de saturación del $CaCO_3$.
p-Ca _r	= Parámetro de saturación del $CaCO_3$ en el agua de rechazo.
pH _a	= Valor pH agua de alimentación.
pH _p	= Valor pH agua producto.
pH _{p-est}	= Valor pH agua producto en las condiciones estándar.
pH _{p-desf}	= Valor pH agua producto en las condiciones desfavorables.
pH _r	= Valor pH agua de rechazo.
pH _{r mín}	= Valor pH mínimo del agua de rechazo.
pH _{r máx}	= Valor pH máximo del agua de rechazo.
pH _s	= Valor pH de saturación.
pH _{s r}	= Valor pH de saturación del agua de rechazo.
p-HCO ₃	= Parámetro de saturación del $CaCO_3$.
p-HCO _{3r}	= Parámetro de saturación del $CaCO_3$ en el agua de rechazo.
PI	= Producto iónico.
PI_{CaF2r}	= Producto iónico del fluoruro cálcico del rechazo.
PI_{CaSO4r}	= Producto iónico del sulfato cálcico del rechazo.
PI_{BaSO4r}	= Producto iónico del sulfato de bario del rechazo.
PI_{SrSO4r}	= Producto iónico del sulfato de estroncio del rechazo.
Pm_i	= Peso molecular (iónico) del ión i presente en el agua.
P_p	= Presión del permeado o agua producto.
PO	= Presión osmótica.

P_s	= Paso de sales.
Ps_m	= Paso de sales de la membrana m.
Q	= Caudal de producción en $m^3/día$.
Q_a	= Caudal de alimentación en m^3/h .
Qa_m	= Flujo agua a través membrana m.
Qa_{mi}	= Flujo de permeado del elemento i.
Q_j	= Flujo ión j.
Q_{ji}	= Flujo ión j a través de la membrana del elemento i.
Q_p	= Caudal de producto o permeado en m^3/h .
Q_{p1e}	= Caudal de producto de la 1ª etapa en m^3/h .
Q_{p-1e-4}	= Caudal de producto de la 1ª etapa, módulos Ø4", en m^3/h .
Q_{p-1e-8}	= Caudal de producto de la 1ª etapa, módulos Ø8", en m^3/h .
Q_{p2e}	= Caudal de producto de la 2ª etapa en m^3/h .
Q_{p-2e-4}	= Caudal de producto de la 2ª etapa, módulos Ø4", en m^3/h .
Q_{p-2e-8}	= Caudal de producto de la 2ª etapa, módulos Ø8", en m^3/h .
$Q_{pemáx}$	= Flujo máximo de agua producto por elemento de OI.
$Q_{pe-máx-4}$	= Flujo máximo de agua producto por elemento de OI, de Ø4".
$Q_{pe-máx-8}$	= Flujo máximo de agua producto por elemento de OI, de Ø8".
Q_{pemed}	= Flujo medio de agua producto por elemento de OI.
$Q_{pe-med-4}$	= Flujo medio de agua producto por elemento de OI, de Ø4".
$Q_{pe-med-8}$	= Flujo medio de agua producto por elemento de OI, de Ø8".
Q_r	= Caudal de rechazo en m^3/h .
Q_{r1e}	= Caudal de rechazo de la 1ª etapa en m^3/h .
Q_{r-1e-4}	= Caudal de rechazo de la 1ª etapa, módulos Ø4", en m^3/h .
Q_{r-1e-8}	= Caudal de rechazo de la 1ª etapa, módulos Ø8", en m^3/h .
Q_{r2e}	= Caudal de rechazo de la 2ª etapa en m^3/h .
Q_{rm}	= Caudal de rechazo por módulo en m^3/h .
Q_{rm-4}	= Caudal de rechazo por módulo de Ø4", en m^3/h .
Q_{rm-8}	= Caudal de rechazo por módulo de Ø8", en m^3/h .
Q_{rm1e}	= Caudal de rechazo por módulo de la 1ª etapa en m^3/h .
$Q_{rm-1e-4}$	= Caudal de rechazo por módulo Ø4", de la 1ª etapa en m^3/h .
$Q_{rm-1e-8}$	= Caudal de rechazo por módulo Ø8", de la 1ª etapa en m^3/h .

$Q_{rm-mín-4}$	= Caudal de rechazo mínimo por módulo de Ø4", en m ³ /h.
$Q_{rm-mín-8}$	= Caudal de rechazo mínimo por módulo de Ø8", en m ³ /h.
Q_{rm2e}	= Caudal de rechazo por módulo de la 2ª etapa en m ³ /h.
$Q_{rm-2e-4}$	= Caudal de rechazo por módulo de Ø4" de la 2ª etapa en m ³ /h.
$Q_{rm-2e-8}$	= Caudal de rechazo por módulo de Ø8" de la 2ª etapa en m ³ /h.
Q_{sm}	= Flujo sal a través membrana m.
r	= Rechazo.
R	= Recuperación o Conversión de la planta o del sistema de OI.
R_{defini}	= Recuperación definitiva del sistema de OI.
\bar{R}_i	= Recuperación media por elemento de OI del sistema.
R_j	= Recuperación en el módulo j.
R_m	= Recuperación o Conversión de la membrana m.
$R_{máx}$	= Recuperación máxima del sistema de OI.
$R_{máx-adopt}$	= Recuperación máxima adoptada.
$R_{máx-SiO_2}$	= Recuperación máxima para la sílice.
$R_{máx-CaCO_3}$	= Recuperación máxima para el carbonato cálcico.
$R_{máx-CaSO_4}$	= Recuperación máxima para el sulfato cálcico.
$R_{máx-BaSO_4}$	= Recuperación máxima para el sulfato de bario.
$R_{máx-SrSO_4}$	= Recuperación máxima para el sulfato de estroncio.
$R_{máx-CaF_2}$	= Recuperación máxima para el fluoruro cálcico.
$R_{mín}$	= Recuperación mínima del sistema de OI.
R_{OI}	= Recuperación del sistema de OI.
R_s	= Rechazo de sales.
R_{si}	= Rechazo de sales del elemento i.
RS_m	= Rechazo de sales de la membrana m.
\bar{R}_s	= Valor medio del rechazo de sales de todos los elementos.
s	= Saturación.
S&DSI	= Índice de saturación o estabilidad de Stiff y Davis.
SDI	= Índice de atascamiento o ensuciamiento.
S_E	= Superficie activa de membrana por elemento de OI.
S_{E-4}	= Superficie activa de membrana por elemento de OI, de Ø4".
S_{E-8}	= Superficie activa de membrana por elemento de OI, de Ø8".

STD	= Sales totales disueltas.
STD _a	= Sales totales disueltas del agua de alimentación.
STD _p	= Sales totales disueltas del agua producto.
STD _{p-est}	= Sales totales disueltas del producto en condiciones estándar.
STD _{p-desf}	= Ídem en condiciones desfavorables.
STD _r	= Sales totales disueltas del agua de rechazo.
SW	= Seawater.
t	= Tiempo.
T	= Temperatura en grados centígrados.
T _{máx}	= Temperatura máxima en grados centígrados.
T _{med}	= Temperatura media en grados centígrados.
T _{míni}	= Temperatura mínima en grados centígrados.
TCF	= Temperature Correction Factor.
TFC	= Thin Film Composite.
TW	= Tapwater.
UF	= Ultrafiltración.
z _i	= Carga iónica del ión i presente en el agua.
Π	= Presión osmótica de una solución.
Π _a	= Presión osmótica del agua de alimentación.
Π _{ai}	= Presión osmótica del agua de alimentación al elemento i.
Π _{ar}	= Ídem de la concentración media alimentación-rechazo.
Π _{ari}	= Ídem del elemento i.
Π _{d_m}	= Presión osmótica diferencial a través de la membrana m.
Π _{d_{mi}}	= Ídem a través de la membrana del elemento i.
Π _p	= Presión osmótica del agua producto.
Π _{pi}	= Presión osmótica del agua producto del elemento i.
Δ \bar{P} _{ar}	= Caída de presión alimentación / rechazo del sistema de OI.
Δ \bar{P} _{ari}	= Caída de presión alimentación / rechazo en el elemento i.

REFERENCIAS

- (1) Sourirajan, S. *Reverse Osmosis*. Academic Press, New York. (1970).
- (2) Merten, U., Lonsdale, H. K. and R. L. Riley. "Boundary-Layer Effects in Reverse Osmosis". *Industrial Engineering Chemistry Fundamentals*. 3, 210-213. (1964).
- (3) Lonsdale, H. K., Merten, U. and R. L. Riley. *J. Appl. Polym Sci*, 9, 1341. (1965).
- (4) Lonsdale, H. K. and R. L. Riley. *Synthetic Membranes: Science, Engineering and Applications*. P. M. Bungay et al. (eds.), 314, (1986).
- (5) J. W. Mccutchan. *Reverse Osmosis and Synthetic Membranes*. S. Sourirajan, 541-562. (1977).
- (6) Dresner, L., J. S. Johnson, Jr. *Principles of Desalination*. K. S. Splieger and A. D. K. Lairds eds., Part B, 503-505. (1980).
- (7) M. C. Porter. *Synthetic Membranes: Science, Engineering and Applications*. P. M. Bungay et al. (eds.), 372-375. (1986).
- (8) Gulf Environmental Systems, Co. *Reverse Osmosis Principles and Applications*. Report 10023, 37 (1974).
- (9) Filmtec, Co. *Filmtec Technical Bulletin*. June (1984).
- (10) Dresner, L., Minturn R. E. *Calcium Sulphate Scaling in RO of Brackish Water by Hollow Fiber and Spiral Wound Modules*. OSW, Membrane Division, ORNL-TM-4330, 120. (1973).
- (11) Filmtec, Co. *Filmtec Technical Manual*. April (1995).

CAPITULO VI: DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

6.1.- Condiciones iniciales.

6.2.- Diagrama de flujos.

6.3.- Características.

6.1.- Condiciones iniciales.

* Capacidad de la planta¹320 m³/día.

* Tiempo de operación (Día/Total).....24 horas/5 años.

* Requerimientos para el producto:

-Destino.....Riegos agrícolas.

-STD.....<350 mg/l.

-pH.....6,5.

* Agua a tratar:

-Tipo.....Salobre.

-Procedencia.....Pozo.

-Temperatura²22°C.

-SDI.....2.7.

-pH.....7.80.

-Conductividad.....5280 µΩ/cm.

-Análisis químico (mg/l como ión):

Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SiO ₂	Fe	STD
96.04	139.68	955.00	32.30	668.70	695.19	382.42	962.93	35.00	0.10	3968

* NOTAS:

1: A partir de las primeras 2300 horas de operación de la planta, se realizó una ampliación de la misma, quedando el primer apartado como sigue:

-Capacidad de la planta.....370 m³/día.

2: Al ser la temperatura aproximadamente constante a lo largo del año, se considera como tal.

6.2.- Diagrama de flujos.

De acuerdo a las especificaciones de diseño del fabricante de elementos de OI (membranas) a utilizar **(1)**, en base a los condicionantes del apartado anterior. La planta responde al diagrama de flujos mostrado (*Figura F-VI/1*), de cuya observación se desprende:

El agua bruta a tratar, procedente del pozo de toma, es enviada mediante la correspondiente bomba de captación (BC) al depósito de alimentación. Posteriormente es conducida desde el depósito anterior a la sección de pretratamiento por medio de la bomba de alimentación (BA).

El pretratamiento consiste, según se puede observar en el diagrama de flujos, en filtración en grava (arena), dosificación en línea de anti-incrustante y microfiltración en cartuchos.

El agua bruta a tratar, tras pasar por el sistema de pretratamiento (agua de alimentación), es recibida por la bomba de alta presión (BAP) que la transfiere en las

condiciones de presión y caudal deseadas al sistema de osmosis inversa de la planta.

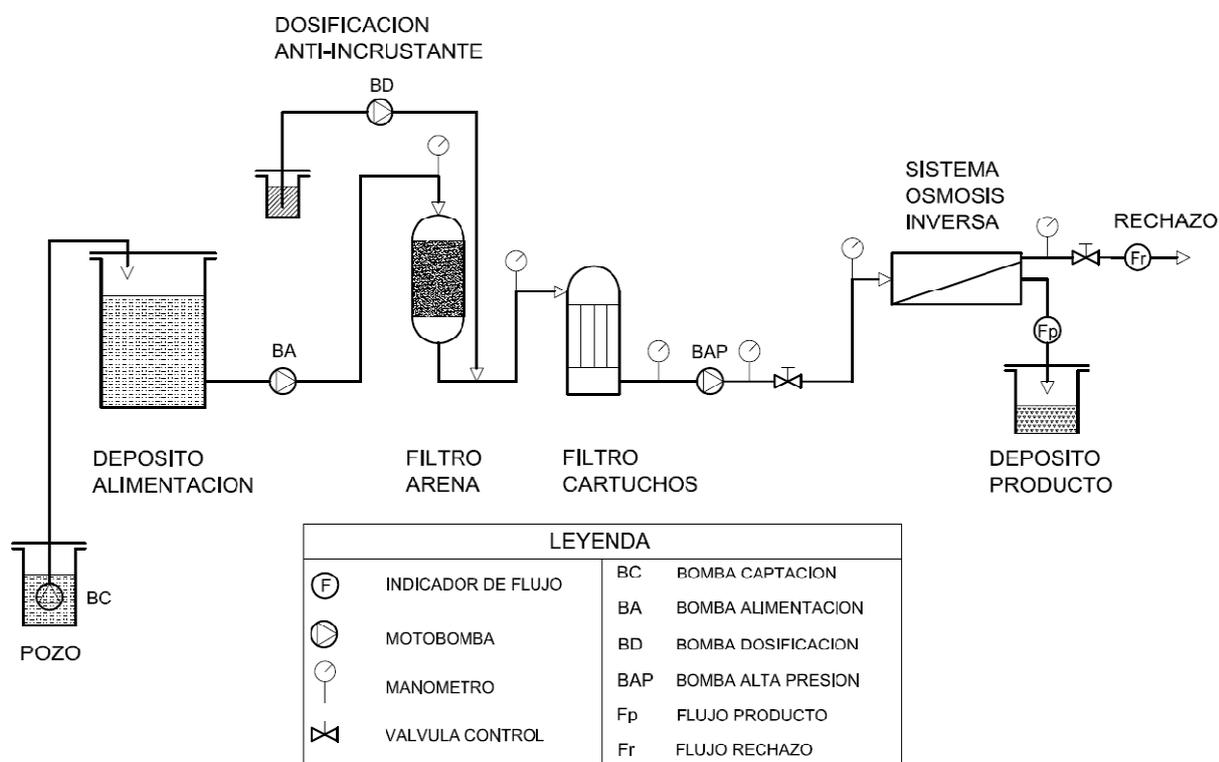


FIGURA F-VI/1

Una vez tratada en los módulos de OI, se divide en dos corrientes, una de agua producto y otra de agua de rechazo.

El agua producto vierte en el correspondiente depósito y constituye el volumen de producción de la planta.

La corriente de concentrado o rechazo se envía al colector de rechazo de la zona, a través del cual se conduce directamente al mar.

El caudal de producción de la planta, así como el factor de conversión de la misma se regulan mediante válvulas de control, situadas en la descarga de la bomba de alta presión y a la salida del agua de rechazo del sistema de OI, observando las lecturas de los indicadores de presión (manómetros) y de los medidores de flujo

(caudal) de lectura directa situados en las líneas de producto (Fp) y rechazo (Fr).

6.3.- Características.

Como se vio en el Capítulo 3, apartado 3.1.2, los equipos de la planta desaladora asociados a los sistemas de pretratamiento y tratamiento son:

- SISTEMA DE PRETRATAMIENTO:
 - Equipo de captación.
 - Equipo de alimentación.
 - Equipo de filtración.
 - Equipo de dosificación.

- SISTEMA DE TRATAMIENTO:
 - Equipo de bombeo a alta presión.
 - Equipo de OI.

No se han considerado equipos asociados al sistema de postratamiento, ya que la planta carece del mismo por ser el destino final del agua producto, riegos agrícolas. Resultando ser adecuadas las condiciones de esta, a su salida del sistema de OI, como se expone en el apartado final de este Capítulo.

Los sistemas de pretratamiento y tratamiento, así como sus correspondientes equipos, presentan las características que se indican a continuación.

6.3.1.- Sistema de pretratamiento.

- * CARACTERISTICAS GENERALES:

- Tipo filtración.....Arena-Cartuchos.
- Grado filtración.....5 micras.
- Dosificación ácido.....No.
- Anti-incrustante.....F-100 **(2)**.
- LSI del rechazo.....<2.

* EQUIPO DE CAPTACION:

Siendo la procedencia del agua bruta a tratar un pozo, cerrado y situado en la sala de máquinas que contiene a la planta desaladora, de 40 m. de profundidad y 2,5 m. de diámetro.

La planta dispone, por tanto, de un equipo de impulsión a baja presión, para captar el agua del pozo de toma y enviarla al depósito de alimentación.

Se trata de una motobomba centrífuga sumergible, construida en acero inoxidable AISI-316, de 6 impulsores, y cuyas principales características son las siguientes:

- Modelo.....SP 45-6 **(3)**.
- Caudal.....30 m³/h.
- Altura manométrica.....45 m.
- Potencia.....10 CV.
- Fases.....III.

- Tensión.....380/660 V.
- Frecuencia.....50 Hz.
- Arranque.....Estrella-Triángulo.

La motobomba dispone de dos equipos de hidronivel, situados en el pozo y en el depósito de alimentación respectivamente, cuya misión es la puesta en marcha y parada automáticas.

La tubería de impulsión de la motobomba, desde el pozo al depósito de alimentación, es de polietileno (PE). De 90 mm de diámetro y 6 atm de presión nominal.

*** EQUIPO DE ALIMENTACION:**

A la entrada a la planta se dispone de un equipo de impulsión a baja presión, para tomar el agua del depósito de alimentación, hacerla pasar a través del equipo de filtración y servirla en las debidas condiciones de presión y caudal al equipo de bombeo a alta presión.

Consiste en una motobomba centrifuga de superficie (1 impulsor), construida en acero inoxidable AISI-316 y cuyas principales características son las siguientes:

- Modelo.....MONOBLOCK RD-70 **(4)**.
- Caudal.....30 m³/h.
- Altura manométrica.....33 m.
- Potencia.....7,5 CV.
- Fases.....III.

- Tensión.....380/220 V.
- Frecuencia.....50 Hz.
- Arranque.....Directo.

La motobomba dispone de cebado automático y equipo de hidronivel en el depósito de alimentación, para parada automática de protección en caso de falta de líquido.

La tubería de impulsión de la motobomba de alimentación, hasta la entrada a la motobomba de alta presión es de PVC de 75 mm de diámetro y 10 atm de presión nominal.

*** EQUIPOS DE FILTRACION Y DOSIFICACION:**

El agua bruta suele llevar partículas en suspensión que podrían dañar la instalación. Por esta causa, a la entrada a la planta se dispone de un equipo de doble filtración en línea, grava y cartuchos, para suministrar el agua de alimentación en las debidas condiciones al sistema de tratamiento de la planta.

El filtro de grava es de ejecución cerrada, construido en poliéster reforzado con fibra de vidrio, para una presión nominal de 6 atm.

El lecho es de arena, con una altura de capa filtrante de 900 mm, talla efectiva 0,55 mm, granulometría 0,4/0,8 mm y velocidad de filtración inferior a 15 m/h. Conexiones entrada/salida de 2 1/2”.

El filtro dispone de válvula de seguridad, para descarga en caso de sobrepresión y de juego de manómetros, válvulas y accesorios para realizar su limpieza a contracorriente.

Una vez, ha pasado el agua a tratar por el filtro anterior, se la somete a un pretratamiento químico a base de anti-incrustante (dispersante).

La dosificación de dispersante tiene por objeto prevenir/evitar las precipitaciones de carbonatos y sulfatos sobre la superficie de las membranas.

Para una dosis de 5 mg/l. El caudal de dosificación a suministrar por la bomba dosificadora, a solución 100% concentrada y para un caudal de agua de alimentación máximo de 30 m³/h, sería de:

$$5 \cdot 30 = 150 \text{ g/h} = 0,15 \text{ kg/h}$$

El equipo de dosificación, es capaz de aportar un caudal de dosificación mínimo/máximo de 0,05/0,5 l/h de solución 100% concentrada, o el caudal equivalente para soluciones diluidas.

La bomba dosificadora, de tipo electrónica, monofásica 220 V y 50 Hz, de 20 W de potencia, esta provista de un variador de frecuencia y de una regulador de la apertura de la válvula de descarga, que permiten el ajuste del caudal de dosificación deseado.

El equipo de dosificación dispone del correspondiente depósito de polietileno de 100 litros de capacidad, con equipo de hidronivel incorporado.

El agua de alimentación una vez ha pasado el filtro de grava y ha sido químicamente tratada, se somete a un filtraje superior, mediante cartuchos de alta filtración. Esta última filtración tiene como objeto, proteger los equipos asociados al sistema de tratamiento de la planta.

La planta dispone de dos filtros provistos de elementos filtrantes a base de cartuchos bobinados de polipropileno, con un grado de filtración de 5 micras. Por lo que todas las partículas presentes en el agua de alimentación, de tamaño superior a las 5

micras quedarán retenidas por la masa filtrante, así como una parte de las de tamaño inferior, por efecto "barrera".

Una vez colmatados los cartuchos filtrantes, lo que ocurre normalmente cada 2-3 meses de operación continua, son cambiados por otros de nuevo uso. Resultando un promedio de 4-6 renovaciones anuales.

Los filtros de cartucho presentan las siguientes características:

- Modelo..... ST-BC-6 (5).
- Número de filtros..... 2.
- Conexiones..... 2".
- Caudal nominal (filtro/total)..... 15/30 m³/h.
- Tipo de cartuchos..... Polipropileno.
- Longitud.....40".
- Número de cartuchos (filtro/total).....6/12.
- Presión nominal..... 8 kg/cm².
- Grado de filtración..... 5 micras.
- Ejecución..... AISI-316.

A la salida de los filtros de cartucho, se dispone de las necesarias derivaciones para medición de conductividad y del índice de atascamiento (SDI), así como de la correspondiente válvula para toma de muestras.

De esta manera, el agua de alimentación se encuentra en condiciones para ser enviada al sistema de tratamiento de la planta.

6.3.2.- Sistema de tratamiento.

* CARACTERISTICAS GENERALES:

-Número de pasos.....	1.
-Número de etapas.....	2.
-Tipo de membrana.....	PA.
-Elemento OI(Tipo/Modelo).....	Espiral/BW30-8040 (1).
-Arreglo etapas ¹	2·(4-8040)*2·(4-8040).
-Número de elementos por PV (módulo).....	4.
-PV (Modelo/Diámetro).....	U8B-4/8" (6).
-PV (Presión Máxima de Servicio).....	42 kg/cm ² .
-Total PV ²	4(2+2).
-Total elementos ³	16(8+8).
-Recuperación máxima ⁴	60%.
-Presión de operación (Inicial/3 años).....	20/24 kg/cm ² .

* NOTA: A partir de las primeras 2300 horas de operación de la planta, se realizó una ampliación de la misma, quedando los parámetros afectados de la siguiente forma:

- 1.- Arreglo etapas..... $3 \cdot (4-8040)^2 \cdot (4-8040)$.
- 2.- Total PV (módulos)..... $5(3+2)$.
- 3.- Total elementos..... $20(12+8)$.
- 4.- Recuperación máxima.....65%.

La figura F-VI/2 refleja el sistema de tratamiento definitivo.

* EQUIPO DE BOMBEO A ALTA PRESION:

El equipo de bombeo a alta presión, construido con materiales adecuados para resistir altas presiones y la acción corrosiva del agua a tratar, transmitirá al agua de alimentación la presión necesaria para vencer la presión osmótica y pasar a través de las membranas, consiguiéndose con ello la eliminación de las sales disueltas en un alto porcentaje. Presenta las características siguientes:

- Tipo.....Centrífuga multietapa.
- Modelo.....CRN 30-160 **(7)**.
- Caudal..... $25-30 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Presión (Según caudal)..... $20/24 \text{ kg/cm}^2$.
- Potencia.....40 CV.

- Fases.....III.
- Tensión.....380/660 V.
- Frecuencia.....50 Hz.
- Arranque.....Estrella/Triángulo.
- Presión de entrada.....1 kg/cm².
- Ejecución.....AISI-316.

Las tuberías de alta presión, esto es, la general de descarga, las de derivación a los tubos de presión (PV), las de salida del rechazo de estos, las del colector general de rechazo, así como la de enlace de este con la válvula de control de flujos, están realizadas en acero inoxidable tipo AISI-316L. Siendo las válvulas incorporadas a ellas del mismo material.

El arranque y parada de la motobomba se realiza de forma secuencial, automática y de forma que, tanto el caudal como la presión de alimentación a los módulos de OI, sube de forma escalonada y durante una secuencia de tiempo suficiente para purgar completamente el sistema de OI, evitando con ello problemas de cavitación que podrían dañar las membranas de OI, hasta llegar a la presión nominal de operación.

Como medida de seguridad, están instalados tanto en la aspiración como en la descarga de la bomba, sendos presostatos que la dispararán en caso de falta de presión (aspiración) o en caso de sobrepresión (descarga) por cierre circunstancial de alguna válvula.

Asimismo, en la aspiración y en la descarga de la bomba están instalados manómetros indicadores de presión para control de la misma.

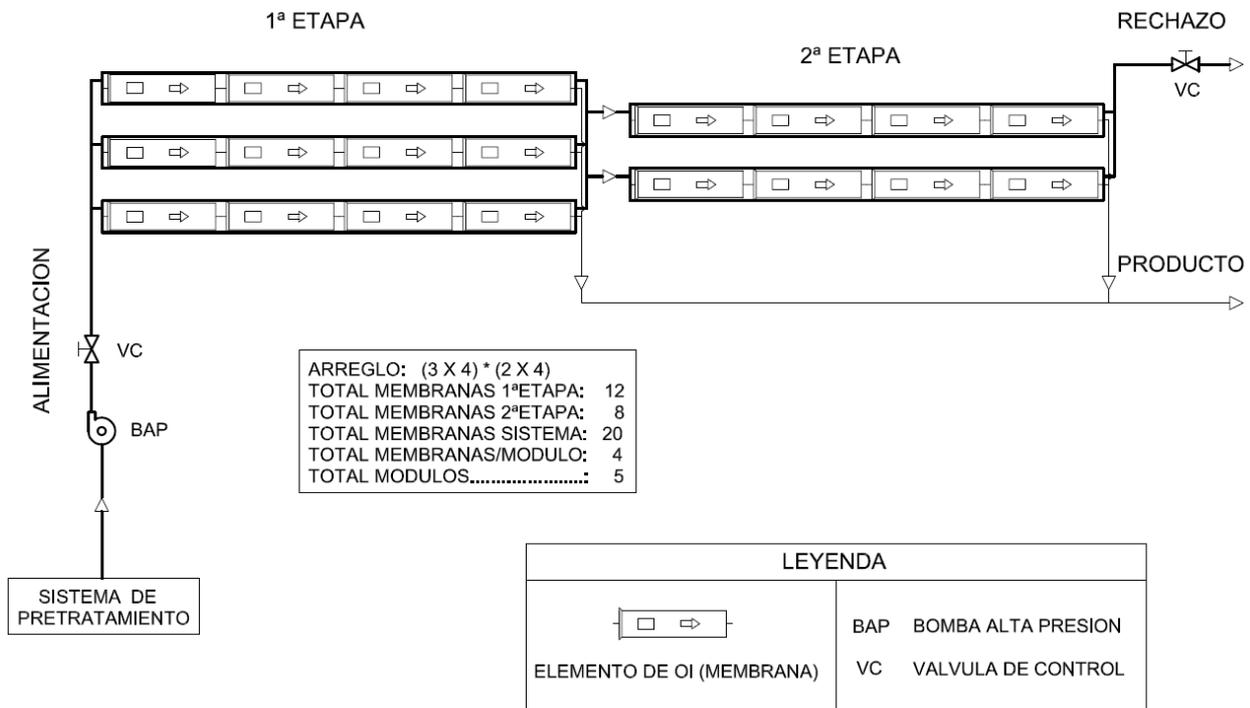


FIGURA F-VI/2: SISTEMA DE OI

* EQUIPO DE OI:

El equipo de OI comprende a su vez, los elementos de OI (membranas) conectados entre sí y alojados en el interior de los necesarios tubos de presión (PV) (módulos) (figuras F-VI/2 y F-VI/3).

Los elementos de OI, reciben la línea de flujo del agua de alimentación a alta presión, produciéndose en ellos el efecto de OI, el rechazo de cada uno de ellos pasa a ser la corriente de alimentación del siguiente, mientras que los "productos" se recogen en los tubos centrales de los mismos.

Después de ser tratada el agua en los elementos de OI, sale de éstos y de los tubos de presión (módulos) por dos corrientes diferenciadas, una de ellas corresponde al agua desalada o "Producto" y la otra el agua concentrada o "Rechazo", como puede apreciarse en los gráficos de las figuras anteriormente citadas.

La corriente de agua producto a la salida de los módulos de OI pasa al depósito

de equilibrio osmótico, a partir del cual es conducida, por gravedad, al depósito de agua producto.

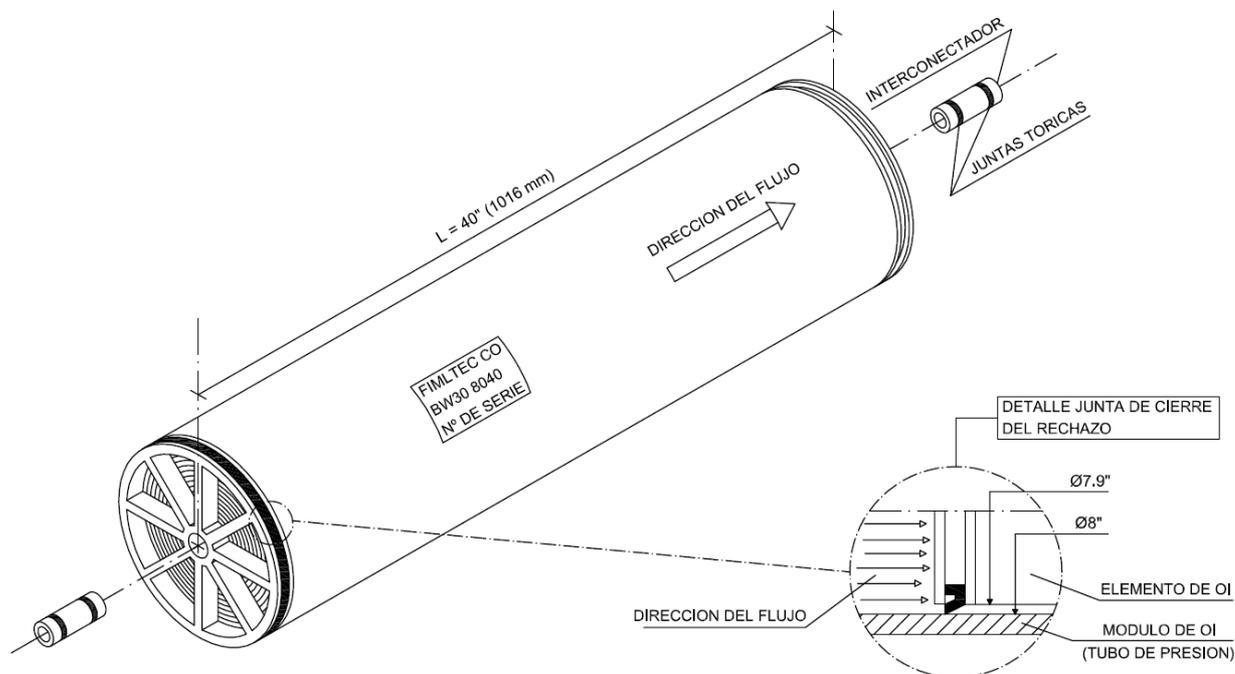


FIGURA F-VI/3: ELEMENTO DE OI

Los módulos de OI pueden ser operados a diferentes presiones de alimentación y recuperaciones o conversiones, dentro del rango que permita la motobomba de alta presión, dependiendo de la evolución de los parámetros característicos de la planta, condiciones del agua bruta a tratar, etc.

Para modificar la presión de alimentación, se actúa sobre la válvula de regulación incorporada a la línea de descarga del equipo de bombeo a alta presión y para modificar el grado de recobro o conversión se actuará sobre la válvula de regulación, situada en la línea de rechazo, observándose las medidas de los caudales de producto y rechazo en los correspondientes medidores de flujo de lectura directa de la planta.

Ambas válvulas de control, de tipo punzón, permiten ajustes precisos y pueden ser operadas fácilmente para lograr las condiciones de presión y recuperación

adecuadas.

El conjunto formado por los 5 tubos de presión (módulos), que alojan en su interior a los 20 elementos de OI, está situado en un bastidor de acero, de forma que la disposición de los tubos es horizontal y en paralelo. Cada tubo de presión, tal y como puede apreciarse en la figura F-VI/2, dispone en su interior de cuatro (4) membranas (cartuchos o elementos de OI), del tipo indicado en la figura F-VI/3, colocadas en serie.

El conjunto de los tubos (PV) **(6)** esta dispuesto para un solo paso en dos etapas de desalación, con un arreglo del tipo 3:2, 3 tubos en 1ª etapa y 2 en 2ª, con objeto de conseguir la producción y conversión previstos.

Las membranas utilizadas en la planta están realizadas en poliamida (PA), compuestas de capa fina, del tipo TFC (Thin Film Composite), con alta densidad de empaquetado y su configuración modular es de arrollamiento en espiral (Ver Capítulo 3, Apartado. 3.2).

Son del tipo BW30-8040 de Dow/Filmtec **(1)**. Estos elementos de OI disponen de una superficie activa nominal de membrana de 330 ft² (31 m²), dispuesta en espiral en el interior de un módulo cilíndrico de 8" de diámetro y 40" de longitud (*figura F-VI/3*).

Según especificaciones del fabricante, presentan un rechazo de sal al ión cloruro, mínimo del 96% y estándar del 98%. Están diseñados para una presión máxima de operación de 42 kg/cm², permitiendo una temperatura máxima del agua de alimentación de 45°C, con un máximo índice de atascamiento (SDI) de 5.

Otras de sus características operacionales son:

. Tolerancia al cloro libre (mg/l)	<0,1
. Turbidez máx. en alimentación	1 NTU

. Rango de pH en operación (Mín./Máx.)	2/11
. Rango de pH en limpiezas (Mín./Máx.)	1/12

6.3.3.- Equipos auxiliares.

Dentro de este apartado incluimos el depósito de equilibrio osmótico o retrolavado, el equipo para la limpieza química de las membranas, los depósitos de alimentación y producto, y el equipo de instrumentación para maniobra, mando y control de la planta.

*** DEPÓSITO DE EQUILIBRIO OSMÓTICO O RETROLAVADO.**

En la parte superior de la sala de máquinas se dispone de un depósito de PVC de 1.000 litros de capacidad, con entrada de agua por la parte inferior y salida por la parte superior. El depósito esta situado de forma que su fondo resulta a una cota superior que el más alto de los tubos de presión de la planta. Este depósito tiene como misión contener el agua suficiente para hacer frente a:

a) El fenómeno de la osmosis directa que se produce en el sistema de OI, durante las paradas de la planta.

b) El volumen de agua producto, necesario para otros usos, como pueden ser limpiezas químicas, desplazamiento del agua de alimentación de los equipos de la planta, preparación de reactivos, etc.

Cuando se para la instalación, en el interior de los módulos de OI tenemos dos tipos de agua, una muy salina y otra de muy baja salinidad, ambas separadas por las membranas semipermeables.

Al ser nula la presión de alimentación, la presión neta a través de los elementos

de OI sería la diferencia de presiones osmóticas a un lado y otro de las membranas. Por lo que el agua menos salina (producto) pasaría hacia el lado del agua más concentrada (rechazo), en virtud del fenómeno de osmosis natural o directa, y podrían quedarse secas las fibras de membrana por el lado del permeado (producto).

Este depósito cubrirá por tanto estas circunstancias, al poder retornar el agua producto por gravedad, ya que como anteriormente se indicó, la entrada desde los módulos al tanque se produce por la parte inferior.

Este sistema entra en funcionamiento desde el momento en el que se produce la parada de la planta, provocada o no.

Con este volumen de agua, tal y como se indicó en el apartado 3.7.4 del Capítulo 3 ("Limpieza osmótica"), se impide así también, la precipitación de sales en el interior de las membranas y la corrosión del acero inoxidable por parte del agua de alimentación concentrada y estancada. Hay que tener en cuenta que el efecto del dispersante no es largo y, por lo tanto, al cabo de un cierto tiempo, podrían precipitar ciertas sales insolubles si nada lo impidiera.

Tanto para el lavado de los módulos de OI, como para su posterior aclarado, es preciso disponer de un almacenamiento de agua producto (libre de cloro), del que se pueda aspirar el agua suficiente para efectuar este aclarado.

El agua sale por rebose del depósito y pasa por gravedad posteriormente al depósito de almacenamiento de agua producto (situado en el exterior de la sala), a través de la correspondiente tubería de agua producto.

Con esto, se asegura que el depósito de equilibrio osmótico permanezca siempre lleno para hacer frente a las eventualidades citadas.

* EQUIPO DE LIMPIEZA QUÍMICA.

Poco a poco, con el funcionamiento de la planta, las membranas de OI se van atascando, descendiendo el caudal producido por los módulos que las contienen.

El atascamiento puede deberse a materias coloidales, a pequeñas precipitaciones de hierro, compuestos pesados y poco solubles, etc.

Con objeto de mantener bajo control estos atascamientos y restituir a las membranas y, por tanto a los módulos que las contienen, las propiedades perdidas, se procedió a su lavado periódicamente.

Como puede observarse en el siguiente Capítulo, los ciclos de limpieza se han sucedido aproximadamente de una forma periódica. En general se ha procedido a efectuar la limpieza química de los módulos cuando se ha observado un cierto incremento en la presión de alimentación o en la pérdida de carga a través de los tubos de presión, fuera de lo razonable (superior a un 10%), para mantener un caudal fijo de producción, o bien cuando se observó una disminución de este en la misma proporción (10%), para unas condiciones de operación fijas.

Antes de proceder a realizar la limpieza química, se realiza un desplazamiento de la solución residual contenida en los módulos de OI una vez se ha parado la planta, con la propia agua de alimentación a baja presión.

Esta operación de desplazamiento es una función de rutina que se realiza antes y después de la limpieza química de las membranas, y también cuando la planta se pone fuera de servicio por un tiempo apreciable. Su objeto es aclarar las altas concentraciones salinas presentes en la superficie de las membranas.

El agua dulce requerida para preparar las soluciones de limpieza, se toma de la línea de agua producto de la planta, a la salida del depósito de equilibrio osmótico, estando esta en operación.

El equipo de limpieza química de los módulos de OI dispone de dos depósitos

de 900 litros de capacidad, empleándose la motobomba de alimentación y los filtros de cartucho propios de la planta para este menester, a través de un circuito auxiliar independiente.

La técnica de la limpieza química consiste en recircular la solución limpiadora a alta velocidad, a través de todas las membranas a limpiar, controlando que el caudal de limpieza sea inferior a $9 \text{ m}^3/\text{h}$ por tubo de presión, y que durante esta la presión sea inferior a 4 kg/cm^2 .

El tipo de solución limpiadora requerida, depende de la causa del ensuciamiento, y los diferentes procedimientos de limpieza química se han llevado a cabo conforme con las guías expresas del fabricante de membranas. Las soluciones de limpieza utilizadas se muestran en el Capítulo 7, apartado. 7.1.

* DEPÓSITOS DE ALIMENTACIÓN Y PRODUCTO.

En zonas anexas a la sala de máquinas están situados los depósitos de agua bruta de alimentación y de agua producto.

El depósito de alimentación es un recinto cubierto de hormigón de 90 m^3 de capacidad, revestido interiormente con pintura impermeabilizante. En este depósito se recibe el agua bruta a tratar procedente del pozo de toma, y a su vez, de él se suministra la motobomba de alimentación. Dispone de un equipo de hidroniveles para automatismo de las bombas de captación y de alimentación.

Para recibir el agua producto a la salida del depósito de equilibrio osmótico, se dispone un depósito abierto de hormigón de $12 \times 12 \times 3 = 432 \text{ m}^3$ de capacidad, Este depósito almacena el agua producto de la planta y de él se distribuye la misma hacia los puntos de consumo establecidos (riegos).

* EQUIPO DE INSTRUMENTACIÓN.

Como equipo de instrumentación para maniobra, mando y control de la planta, se dispone en cada fase del proceso de una serie de indicadores, situados estratégicamente, de modo que permiten apreciar el correcto funcionamiento de la planta y que básicamente son válvulas, manómetros, indicadores de caudal, presostatos, etc.

Como equipo de protección, mando y control eléctrico, la planta dispone de un cuadro eléctrico, en el que se encuentran centralizados los correspondientes arrancadores, interruptores, relés de alarma y demás instrumentación, de acuerdo al grado de automatización de la misma.

La planta incluye la siguiente aparamenta auxiliar de control:

- Medidores de flujo (Flotámetros), de lectura directa, para control de las corrientes de producto y rechazo.
- Presostatos, de baja y de alta presión, convenientemente reglados para la puesta en marcha y parada del sistema de forma automática, en casos de averías, accidentes, mala operación, etc.
- 1 Juego de manómetros, que permite conocer en cada momento las presiones de operación de la planta en cada sección de la misma (entrada y salida filtro grava, ídem filtros cartuchos, ídem motobombas y sistema de OI).
- 2 Válvulas en AISI-316 tipo punzón, ya mencionadas, para control de presiones y caudales.
- 2 Circuitos con sus accesorios para la limpieza a contracorriente del filtro de grava y limpieza química de los módulos de la OI.
- 1 Juego de válvulas de retención y purgadores de aire, que permiten mantener el sistema lleno de agua, impidiendo fugas y liberando o purgando el aire.

-1 Conjunto de tuberías y válvulas de alta presión, construidas en acero inoxidable AISI-316L, que nos minimiza el riesgo de corrosión de las mismas y disminuye el peligro de introducción de hierro en las membranas, y por tanto, alarga notablemente su vida de funcionamiento.

-1 Medidor en línea de la conductividad, con indicación de valores para las corrientes de alimentación y producto.

*** EQUIPO DE POSTRATAMIENTO.**

El agua producto a la salida de los módulos de OI, tiene un contenido en sales que la hacen adecuada para su utilización.

Sin embargo es bastante corrosiva, teniendo un índice de Langelier negativo (pH en torno a 5,5-6). Esto es debido por un lado al pH y al contenido en bicarbonatos del agua bruta, y por otro a que la concentración de CO₂ en el agua de alimentación se incorpora, prácticamente, al permeado.

El anhídrido carbónico atraviesa las membranas de OI, ya que estas son permeables a él, haciendo que el agua producida, como se ha indicado, tenga un pH aproximadamente comprendido entre 5,5 y 6. Esto, sumado al bajo contenido en ión calcio y en ión bicarbonato en el agua desalada, hace que el agua sea agresiva.

Si el destino del agua producto fuese para consumo humano, que este no sería el caso, teniendo en cuenta lo anterior y que las normas de potabilidad del agua aconsejan que esta tenga un pH comprendido entre 6,5 y 8,5, sería necesario corregir estas características del agua permeada.

En estos casos y por este concepto, la planta debería de disponer en la fase de postratamiento del agua producida, y a la salida de esta del depósito de equilibrio osmótico, de un adecuado equipo de acondicionamiento final.

Como ya se ha indicado, en la planta desaladora, dado el destino final del agua producto, no se hace necesario postratamiento alguno, y el pH de salida, comprendido entre 5 y 6, resulta idóneo para riego agrícola, ya que al liberarse parte del CO₂ que contiene, en el depósito de agua producto, el pH de utilización será de aproximadamente 6-6,5.

Finalmente, en la figura F-VI/4, se muestra la distribución en la sala de máquinas, de los principales equipos de la planta.

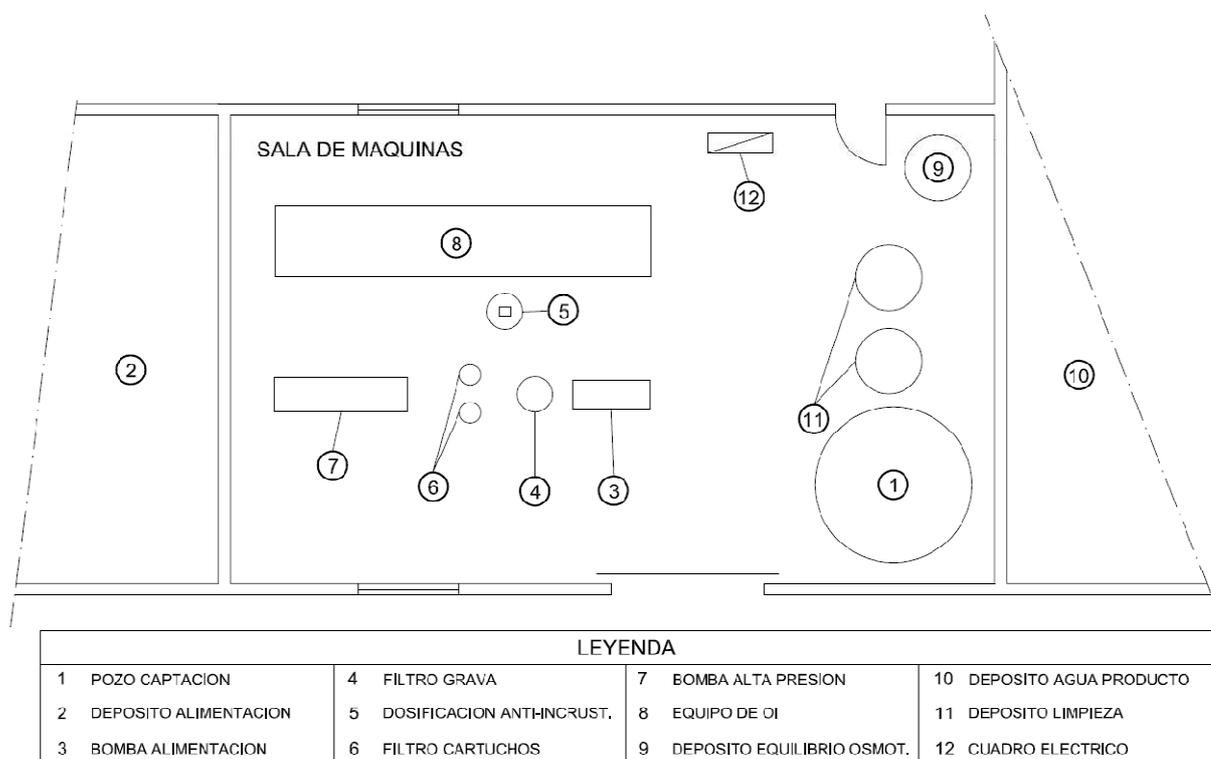


FIGURA F-VI/4: DISTRIBUCIÓN DE EQUIPOS

LISTA DE SIMBOLOS

BA	= Bomba alimentación.
BAP	= Bomba alta presión.
BC	= Bomba captación.
Fp	= Flujo producto.
Fr	= Flujo rechazo
LSI	= Índice de saturación de Langelier.
OI	= Osmosis inversa.
PA	= Poliamida.
PE	= Polietileno.
PV	= Tubo de presión (Pressure Vessel).
SDI	= Índice de ensuciamiento.
STD	= Sales totales disueltas.

REFERENCIAS

- (1) Filmtec Corporation (Dow Chemical Company).
- (2) Anti-incrustante Flocon 100, Chemical Division of Pfizer Inc.
- (3) Bombas Sumergibles SP, Bombas Grundfos España, S.A.
- (4) Bombas Monoblock, Bombas Zeda.
- (5) Multiple Cartridge Vessels, Ametek, Plymouth Product Division. U.S.A.
- (6) Brackish RO Pressure Vessels, Advanced Structures Inc. U.S.A.
- (7) Bombas Multicelulares CRN, Bombas Grundfos España, S.A.

CAPITULO VII: DATOS Y ANÁLISIS DE LA PLANTA

7.1.- Evolución de los parámetros característicos de la planta.

7.2.- Toma de muestras y análisis de las mismas.

7.3.- Normalización del rendimiento del sistema de OI.

7.4.- Estado actual.

7.1.- Evolución de los parámetros característicos de la planta.

A lo largo de 40.000 horas de operación del sistema (5 años), se han tomado diariamente los valores de los 6 parámetros más representativos del rendimiento de la planta:

- Conductividad del agua de alimentación (CDV_a).
- Recuperación del sistema (R).
- Presión de alimentación (P_a).
- Presión diferencial alimentación-rechazo (PD_{ar}).
- Producción o flujo de agua producto (F_p).
- Conductividad del agua producto (CDV_p).

De los datos anteriores, se han considerado y listado en la correspondiente tabla (T-VII/1) (Anexo 2), los datos tomados aproximadamente cada 2 días de operación continua, desechándose los intermedios, al objeto de facilitar su análisis conjunto y evitar repeticiones carentes de valor (Ver columna de t, tiempo de operación en horas).

Esto nos ha permitido la representación gráfica de la evolución de dichos parámetros con el tiempo de operación (*Figuras F-VII/1 a F-VII/6*) (Anexo 3).

En la tabla anterior se ha añadido una columna (LQ/TM), en la que se indican:

- Las tomas de muestras (TM) en las corrientes de alimentación, producto y rechazo de la planta, que en un total de 17 se han realizado y que se analizan con más detalle en el apartado 7.2 de este Capítulo.
- Las limpiezas químicas (LQ) del sistema de OI, a cuyo efecto conviene indicar las siguientes aclaraciones:

A) Las limpiezas químicas se realizaron, de acuerdo a las instrucciones del fabricante de las membranas utilizadas **(1)**, normalmente cada 2-4 meses de operación continua, en general cuando se observó un decrecimiento en la producción del 5-10%, o cuando para una misma producción, se produjo un incremento en la presión de alimentación del mismo porcentaje.

B) Se observará asimismo como las primeras limpiezas, no muestran aparentemente un efecto claro sobre la restauración del rendimiento del sistema. Esto se debe, como puede apreciarse en el apartado 7.3 de este Capítulo, a que el decrecimiento de la productividad o aumento de la presión de operación, han sido provocados más por efecto de la compactación de las membranas, que por ensuciamiento de las mismas. Lo que por otra parte resulta normal en este tipo de sistema de desalación.

C) En orden a evitar cualquier posible grado de hidrólisis en las membranas, de acuerdo a las prescripciones del fabricante y a la experiencia práctica en el tratamiento de aguas similares, se emplearon los siguientes productos químicos, en solución con agua producto de la planta, a su misma temperatura (22°C) y por el mismo orden en el que se indican:

* Durante los 3 primeros años de operación:

1º) Ácido cítrico en solución al 2% y pH \approx 2.5.

2º) Carbonato sódico en solución al 1% y pH entre 10.5 y 11.

* Durante los 2 siguientes años de operación:

1º) Ácido clorhídrico, solución al 0,5% y pH entre 2 y 2.5.

2º) Ácido fosfórico, solución al 0,5% y pH entre 2.2 y 2.5.

3º) Solución formada por hidróxido sódico (0,1%) y sulfato lauril sódico (0,1%), y pH entre 11 y 11.5.

En todos los casos el tiempo de limpieza empleado fue de unos 40 minutos, el volumen de la solución de limpieza 1800 litros, 900 de los cuales se emplearon para cargar el sistema con tiempo de retención de 1-2 horas, antes de proceder al lavado en circuito cerrado con aumentos graduales del caudal y presión, cada 10 minutos y hasta un máximo de presión de 4 kg/cm².

Al objeto de evaluar la posibilidad de uso de otros tipos de anti-incrustantes y comprobar su rendimiento a mayores factores de conversión del sistema, y por tanto superiores índices LSI en el concentrado, durante el 5º año de operación se efectuó el cambio de empleo del F-100 **(2)** al EL-5600 **(3)**.

Por último conviene resaltar, que esta planta, base principal de datos prácticos para el presente trabajo de Tesis Doctoral, continúa en operación desde Enero de 1.986, sin empleo de ácido en la etapa de pretratamiento, como se indicó en el Capítulo VI, con el único uso de anti-incrustantes. Con lo cual se reduce la etapa de pretratamiento, se simplifica el mantenimiento y se evitan posibles postratamientos del agua producto. Constituyó, en su momento, la primera experiencia operacional de este tipo, a 5 años en Canarias.

Parte de los datos y resultados que en este Capítulo se aportan, concretamente lo referentes a los 3 primeros años de operación, han sido objeto del siguiente artículo:

- *GRAPHIC EVOLUTION OF THE 24.000 HOURS (3 YEARS) OPERATING DATA OF A RO BRACKISH WATER DESALINATION PLANT, IN LAS PALMAS, CANARY ISLANDS, SPAIN (4).*

7.2.- Toma de muestras y análisis de las mismas.

Paralelamente a la toma de datos a lo largo del tiempo de operación, es necesario en este tipo de sistema de desalación, el análisis sistemático y periódico de la influencia de los 6 parámetros fundamentales de control sobre el rendimiento de la planta, al objeto de evitar un decrecimiento del mismo, y mantener estos parámetros regulados en los niveles óptimos.

Con esta finalidad, y como se indicó en el apartado anterior, se han tomado 17 muestras representativas de la evolución del proceso de desalación de la planta, a lo largo de sus 40.000 horas de operación, en las corrientes de alimentación, producto y rechazo del sistema de OI.

Las condiciones de operación del sistema en los momentos de toma de las muestras, así como los correspondientes análisis químicos de las soluciones representativas de las corrientes de alimentación y producto están indicadas en las tablas *T-VII/2* y *T-VII/3*.

TABLA T-VII/2 CONDICIONES OPERACIÓN MUESTRAS

Muestra	t	R	SDI _a	pH _a	pH _p	pH _r	Tipo AI	Dosis AI
1	49	56,20	2,7	7,79	6,00	7,94	F-100	7
2	852	57,40	2,7	7,85	6,02	8,00	F-100	7
3	1394	57,00	2,5	7,72	5,75	7,98	F-100	9
4	3205	60,22	2,4	7,65	5,70	7,96	F-100	12
5	5501	54,76	2,4	7,77	5,74	8,00	F-100	12
6	14253	54,00	2,3	7,80	5,78	8,05	F-100	12
7	21955	53,40	2,3	7,87	5,86	8,10	F-100	12
8	24659	53,30	2,4	7,47	5,65	7,67	F-100	12
9	25420	54,10	2,4	7,61	5,65	7,83	F-100	12
10	26789	53,20	2,4	7,52	5,51	7,72	F-100	12
11	28986	52,80	2,3	7,60	5,66	7,80	F-100	12
12	30343	52,50	2,4	7,43	5,53	7,62	F-100	12
13	32931	51,20	2,4	7,49	5,62	7,65	F-100	12
14	35408	53,40	2,5	7,59	5,68	7,81	F-100	12
15	37487	58,70	2,4	7,63	5,44	7,86	EL-5600	5
16	38754	59,20	2,4	7,70	5,73	7,90	EL-5600	5
17	39745	59,30	2,4	7,60	5,50	7,84	EL-5600	5

Notas:

- Temperatura = 22°C.
- t = Tiempo de operación en horas.
- R = Recuperación del sistema en %.
- SDI_a = Índice de ensuciamiento de la alimentación.
- a = Alimentación.
- p = Producto.
- r = Rechazo.
- AI = Anti-incrustante.
- Tipo AI = F-100 **(2)** y EL-5600 **(3)**.
- Dosis de anti-incrustante en mg/l.

TABLA VII/3: ANÁLISIS QUÍMICO MUESTRAS

Muestra 1	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	5,58	111,82	0,05	1,00	99,10
Mg ⁺⁺	11,70	142,27	0,05	0,61	99,57
Na ⁺	46,85	1077,08	2,35	54,03	94,98
K ⁺	0,95	37,15	0,10	3,91	89,47
(HCO ₃) ⁻	12,63	770,68	0,23	14,03	98,18
(SO ₄) ⁻⁻	15,31	735,42	0,02	0,96	99,87
(NO ₃) ⁻	6,57	407,34	1,33	82,46	79,76
Cl ⁻	30,57	1084,01	0,97	34,40	96,83
CATIONES	65,08		2,55		
ANIONES	65,08		2,55		
SiO ₂		30,00		0,50	98,33
Fe		0,10		0,00	
STD		4395,87		191,90	95,63

Muestra 2	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	6,04	121,04	0,05	1,00	99,17
Mg ⁺⁺	10,69	129,99	0,05	0,61	99,53
Na ⁺	46,89	1078,00	2,06	47,36	95,61
K ⁺	0,92	35,97	0,09	3,52	90,22
(HCO ₃) ⁻	12,61	769,46	0,20	12,20	98,41
(SO ₄) ⁻⁻	15,27	733,49	0,02	0,96	99,87
(NO ₃) ⁻	6,44	399,28	1,17	72,54	81,83
Cl ⁻	30,22	1071,60	0,86	30,50	97,15
CATIONES	64,54		2,25		
ANIONES	64,54		2,25		
SiO ₂		26,00		0,30	98,85
Fe		0,10		0,00	
STD		4364,94		168,99	96,13

Muestra 3	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	6,19	124,05	0,05	1,00	99,19
Mg ⁺⁺	11,42	138,87	0,05	0,61	99,56
Na ⁺	39,68	912,24	1,65	37,93	95,84
K ⁺	0,85	33,24	0,08	3,13	90,59
(HCO ₃) ⁻	11,11	677,93	0,10	6,10	99,10
(SO ₄) ⁻⁻	11,85	569,21	0,01	0,48	99,92
(NO ₃) ⁻	6,71	416,02	1,13	70,06	83,16
Cl ⁻	28,47	1009,55	0,59	20,92	97,93
CATIONES	58,14		1,83		
ANIONES	58,14		1,83		
SiO ₂		33,00		0,50	98,48
Fe		0,00		0,00	
STD		3914,11		140,74	96,40

TABLA T-VII/3: ANÁLISIS QUÍMICO MUESTRAS

Muestra 4	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	6,66	133,47	0,05	1,00	99,25
Mg ⁺⁺	13,93	169,39	0,06	0,73	99,57
Na ⁺	42,93	986,96	1,53	35,17	96,44
K ⁺	0,96	37,54	0,09	3,52	90,63
(HCO ₃) ⁻	10,55	643,76	0,10	6,10	99,05
(SO ₄) ⁼	14,14	679,21	0,01	0,48	99,93
(NO ₃) ⁻	6,22	385,64	1,01	62,62	83,76
Cl ⁻	33,57	1190,39	0,61	21,63	98,18
CATIONES	64,48		1,73		
ANIONES	64,48		1,73		
SiO ₂		28,00		0,20	99,29
Fe		0,10		0,00	
STD		4254,46		131,46	96,91

Muestra 5	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	6,90	138,28	0,06	1,20	99,13
Mg ⁺⁺	11,73	142,64	0,05	0,61	99,57
Na ⁺	42,95	987,42	1,32	30,35	96,93
K ⁺	0,91	35,58	0,07	2,74	92,31
(HCO ₃) ⁻	12,50	762,75	0,12	7,32	99,04
(SO ₄) ⁼	13,19	633,58	0,02	0,96	99,85
(NO ₃) ⁻	6,21	385,02	0,76	47,12	87,76
Cl ⁻	30,59	1084,72	0,60	21,28	98,04
CATIONES	62,49		1,50		
ANIONES	62,49		1,50		
SiO ₂		39,00		0,50	98,72
Fe		0,00		0,00	
STD		4208,99		112,07	97,34

Muestra 6	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	7,81	156,51	0,07	1,40	99,10
Mg ⁺⁺	14,00	170,24	0,06	0,73	99,57
Na ⁺	46,14	1060,76	1,40	32,19	96,97
K ⁺	0,92	35,97	0,07	2,74	92,39
(HCO ₃) ⁻	12,61	769,46	0,12	7,32	99,05
(SO ₄) ⁼	16,06	771,44	0,02	0,96	99,88
(NO ₃) ⁻	6,65	412,30	0,80	49,60	87,97
Cl ⁻	33,55	1189,68	0,66	23,40	98,03
CATIONES	68,87		1,60		
ANIONES	68,87		1,60		
SiO ₂		35,00		0,40	98,86
Fe		0,00		0,00	
STD		4601,37		118,74	97,42

TABLA T-VII/3: ANÁLISIS QUÍMICO MUESTRAS

Muestra 7	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	8,09	162,12	0,06	1,20	99,26
Mg ⁺⁺	15,42	187,51	0,05	0,61	99,68
Na ⁺	48,97	1125,82	1,40	32,19	97,14
K ⁺	0,96	37,54	0,07	2,74	92,71
(HCO ₃) ⁻	12,88	785,94	0,11	6,71	99,15
(SO ₄) ⁼	18,28	878,08	0,02	0,96	99,89
(NO ₃) ⁻	6,77	419,74	0,79	48,98	88,33
Cl ⁻	35,51	1259,18	0,66	23,40	98,14
CATIONES	73,44		1,58		
ANIONES	73,44		1,58		
SiO ₂		33,00		0,30	99,09
Fe		0,00		0,00	
STD		4888,93		117,09	97,60

Muestra 8	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	8,19	164,13	0,07	1,40	99,15
Mg ⁺⁺	14,95	181,79	0,10	1,22	99,33
Na ⁺	43,15	992,02	1,18	27,13	97,27
K ⁺	0,87	34,02	0,04	1,56	95,40
(HCO ₃) ⁻	13,86	845,74	0,22	13,42	98,41
(SO ₄) ⁼	12,15	583,63	0,01	0,48	99,92
(NO ₃) ⁻	4,68	290,16	0,46	28,52	90,17
Cl ⁻	36,47	1293,23	0,70	24,82	98,08
CATIONES	67,16		1,39		
ANIONES	67,16		1,39		
SiO ₂		35,00		0,30	99,14
Fe		0,10		0,00	
STD		4419,80		98,86	97,76

Muestra 9	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	7,11	142,48	0,05	1,00	99,30
Mg ⁺⁺	10,63	129,26	0,06	0,73	99,44
Na ⁺	42,29	972,25	1,14	26,21	97,30
K ⁺	0,81	31,67	0,03	1,17	96,30
(HCO ₃) ⁻	15,12	922,62	0,21	12,81	98,61
(SO ₄) ⁼	13,68	657,12	0,01	0,48	99,93
(NO ₃) ⁻	5,90	365,80	0,57	35,34	90,34
Cl ⁻	26,14	926,92	0,49	17,38	98,13
CATIONES	60,84		1,28		
ANIONES	60,84		1,28		
SiO ₂		34,00		0,20	99,41
Fe		0,10		0,00	
STD		4182,23		95,32	97,72

TABLA T -VII/3: ANÁLISIS QUÍMICO MUESTRAS

Muestra 10	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	8,57	171,74	0,07	1,40	99,18
Mg ⁺⁺	16,22	197,24	0,10	1,22	99,38
Na ⁺	47,87	1100,53	1,36	31,27	97,16
K ⁺	0,84	32,84	0,05	1,96	94,05
(HCO ₃) ⁻	13,80	842,08	0,25	15,26	98,19
(SO ₄) ⁼	11,86	569,70	0,01	0,48	99,92
(NO ₃) ⁻	4,42	274,04	0,46	28,52	89,59
Cl ⁻	43,42	1539,67	0,86	30,50	98,02
CATIONES	73,50		1,58		
ANIONES	73,50		1,58		
SiO ₂		32,00		0,30	99,06
Fe		0,10		0,00	
STD		4759,94		110,89	97,67

Muestra 11	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	7,72	154,71	0,06	1,20	99,22
Mg ⁺⁺	13,89	168,90	0,09	1,09	99,35
Na ⁺	42,91	986,50	1,17	26,90	97,27
K ⁺	0,76	29,72	0,03	1,17	96,05
(HCO ₃) ⁻	14,55	887,84	0,23	14,03	98,42
(SO ₄) ⁼	13,13	630,70	0,01	0,48	99,92
(NO ₃) ⁻	5,11	316,82	0,50	31,00	90,22
Cl ⁻	32,49	1152,10	0,61	21,63	98,12
CATIONES	65,28		1,35		
ANIONES	65,28		1,35		
SiO ₂		35,50		0,30	99,15
Fe		0,10		0,00	
STD		4362,88		97,81	97,76

Muestra 12	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	8,48	169,94	0,08	1,60	99,06
Mg ⁺⁺	17,47	212,44	0,19	2,31	98,91
Na ⁺	43,48	999,61	1,21	27,82	97,22
K ⁺	0,86	33,63	0,04	1,56	95,35
(HCO ₃) ⁻	13,71	836,58	0,25	15,26	98,18
(SO ₄) ⁼	11,91	572,10	0,01	0,48	99,92
(NO ₃) ⁻	4,10	254,20	0,41	25,42	90,00
Cl ⁻	40,57	1438,61	0,85	30,14	97,90
CATIONES	70,29		1,52		
ANIONES	70,29		1,52		
SiO ₂		33,00		0,30	99,09
Fe		0,10		0,00	
STD		4550,20		104,89	97,69

TABLA T-VII/3: ANÁLISIS QUÍMICO MUESTRAS

Muestra 13	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	7,92	158,72	0,07	1,40	99,12
Mg ⁺⁺	14,15	172,06	0,16	1,95	98,87
Na ⁺	42,63	980,06	1,17	26,90	97,26
K ⁺	0,82	32,06	0,04	1,56	95,12
(HCO ₃) ⁻	13,93	850,01	0,24	14,64	98,28
(SO ₄) ⁼	12,81	615,33	0,01	0,48	99,92
(NO ₃) ⁻	5,00	310,00	0,46	28,52	90,80
Cl ⁻	33,78	1197,84	0,73	25,89	97,84
CATIONES	65,52		1,44		
ANIONES	65,52		1,44		
SiO ₂		38,00		0,40	98,95
Fe		0,10		0,00	
STD		4354,18		101,74	97,66

Muestra 14	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	7,06	141,48	0,06	1,20	99,15
Mg ⁺⁺	9,87	120,02	0,06	0,73	99,39
Na ⁺	41,81	961,21	1,13	25,98	97,30
K ⁺	0,77	30,11	0,04	1,56	94,81
(HCO ₃) ⁻	14,36	876,25	0,20	12,20	98,61
(SO ₄) ⁼	12,62	606,20	0,01	0,48	99,92
(NO ₃) ⁻	6,10	378,20	0,60	37,20	90,16
Cl ⁻	26,43	937,21	0,48	17,02	98,18
CATIONES	59,51		1,29		
ANIONES	59,51		1,29		
SiO ₂		35,00		0,30	99,14
Fe		0,10		0,00	
STD		4085,78		96,68	97,63

Muestra 15	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	7,20	144,29	0,07	1,40	99,03
Mg ⁺⁺	10,80	131,33	0,10	1,22	99,07
Na ⁺	42,61	979,60	1,23	28,28	97,11
K ⁺	0,66	25,81	0,03	1,17	95,45
(HCO ₃) ⁻	15,33	935,44	0,31	18,92	97,98
(SO ₄) ⁼	13,81	663,36	0,02	0,96	99,86
(NO ₃) ⁻	6,00	372,00	0,61	37,82	89,83
Cl ⁻	26,13	926,57	0,49	17,38	98,12
CATIONES	61,27		1,43		
ANIONES	61,27		1,43		
SiO ₂		33,50		0,30	99,10
Fe		0,10		0,00	
STD		4212,00		107,44	97,45

TABLA T-VII/3: ANÁLISIS QUÍMICO MUESTRAS

Muestra 16	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	6,85	137,27	0,02	0,40	99,71
Mg ⁺⁺	10,76	130,84	0,12	1,46	98,88
Na ⁺	42,17	969,49	1,22	28,05	97,11
K ⁺	0,68	26,59	0,03	1,17	95,59
(HCO ₃) ⁻	15,86	967,78	0,21	12,81	98,68
(SO ₄) ⁼	11,42	548,56	0,02	0,96	99,82
(NO ₃) ⁻	5,61	347,82	0,42	26,04	92,51
Cl ⁻	27,57	977,63	0,74	26,24	97,32
CATIONES	60,46		1,39		
ANIONES	60,46		1,39		
SiO ₂		34,50		0,20	99,42
Fe		0,10		0,00	
STD		4140,58		97,34	97,65

Muestra 17	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Rechazo Sal
ION	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	%
Ca ⁺⁺	6,97	139,68	0,06	1,20	99,14
Mg ⁺⁺	9,55	116,13	0,07	0,85	99,27
Na ⁺	41,67	957,99	1,19	27,36	97,14
K ⁺	0,67	26,20	0,03	1,17	95,52
(HCO ₃) ⁻	14,78	901,88	0,28	17,09	98,11
(SO ₄) ⁼	12,63	606,68	0,01	0,48	99,92
(NO ₃) ⁻	5,77	357,74	0,55	34,10	90,47
Cl ⁻	25,68	910,61	0,51	18,08	98,01
CATIONES	58,86		1,35		
ANIONES	58,86		1,35		
SiO ₂		35,00		0,30	99,14
Fe		0,10		0,00	
STD		4052,01		100,64	97,52

NOTA: Para equilibrar los balances de aniones y cationes se han añadido iones sodio o cloruros, según el caso.

Del análisis teórico de las mismas pueden deducirse importantes resultados:

1º) Descubrir si sobre la superficie de las membranas se están produciendo o no incrustaciones, en las condiciones de operación de la planta en el instante de la toma de muestras. Debido a la ausencia de ácido en el pretratamiento, es fundamental observar si la dosificación y comportamiento del anti-incrustante empleado, son las correctas.

De acuerdo al tipo de agua de alimentación y en las condiciones de operación de la planta, según los apartados 3.4.6 y 3.4.7, Capítulo 3, no se prevén incrustaciones

de sulfato cálcico ni de sílice, ya que en lo que se refiere a esta última, se opera con factores de concentración del sistema que impiden sobresaturaciones en la corriente de rechazo. Por lo que se refiere al sulfato cálcico y por el mismo motivo, tampoco se alcanzan saturaciones del mismo sobre la superficie de las membranas, siendo en este caso la seguridad de operación aún mayor, debido a la presencia de anti-incrustante.

2º) Sin embargo, y como ya se ha indicado anteriormente, sí que es posible prever incrustaciones de carbonato cálcico, por lo que se ha procedido a la determinación del Índice de Saturación de Langelier (LSI), para cada una de las muestras, comprobándose asimismo si su cálculo teórico, según el Capítulo 3, es correcto **(5,6)**:

A) **LSI real.**

A partir de las condiciones de operación (recuperación o conversión del sistema) y de las concentraciones de alimentación y producto, obtenemos por balance, las concentraciones en el rechazo, para cada una de las muestras, y asumiendo que estas son aproximadamente reales, se obtienen los siguientes parámetros, para cada uno de los rechazos de las muestras ((Ec.17/3) a (Ec. 22/3), del Capítulo 3):

* $p\text{-}[\text{HCO}_3^-]_r$ a partir del contenido en iones bicarbonato $[\text{HCO}_3^-]$, expresado en mg/l como CaCO_3 , por la relación:

$$p\text{-}[\text{HCO}_3^-]_r = \log[5 \times 10^4 / (\text{HCO}_3^-)_r] \quad (\text{Ec.1/7})$$

* $p\text{-}[\text{Ca}^{2+}]_r$, a partir del contenido en iones calcio (Ca^{++}), expresado en mg/l como CaCO_3 , por la relación:

$$p\text{-}[\text{Ca}^{2+}]_r = \log(10^5 / [\text{Ca}^{2+}]_r) \quad (\text{Ec.2/7})$$

* C , a partir del contenido en sales totales disueltas (STD), expresado en mg/l y de la

temperatura (22°C) (Gráfico de la figura F-III/24 o aplicando la (Ec.19/3)).

* pH_s (pH de saturación), a partir de los datos obtenidos anteriormente y por la relación:

$$pH_s = p-[HCO_3^-]_r + p-[Ca^{2+}]_r + C \quad (Ec.3/7)$$

* LSI_{real} , a partir de los pH de saturación (pH_s) y de la muestra (pH_r) y por la relación:

$$LSI = pH_r - pH_s \quad (Ec.4/7)$$

Los cálculos anteriores están reflejados en las tablas adjuntas T-VII/4-1 y T-VII/4-2.

TABLA T-VII/4-1: CONCENTRACIONES REALES

Muestra	STD	HCO3	Ca	STD	HCO3	Ca	Conversión	STD	HCO3	Ca
	Alimentación	Alimentación	Alimentación	Producto	Producto	Producto	%	Rechazo	Rechazo	Rechazo
1	4395,87	770,68	111,82	191,90	14,03	1,00	56,20	9790,01	1741,54	254,01
2	4364,94	769,46	121,04	168,99	12,20	1,00	57,40	10018,64	1789,81	282,78
3	3914,11	677,93	124,05	140,74	6,10	1,00	57,00	8916,02	1568,50	287,16
4	4254,46	643,76	133,47	131,46	6,10	1,00	60,22	10495,96	1609,07	334,01
5	4208,99	762,75	138,28	112,07	7,32	1,20	54,76	9168,04	1677,15	304,21
6	4601,37	769,46	156,51	118,74	7,32	1,40	54,00	9863,59	1664,15	338,60
7	4888,93	785,94	162,12	117,09	6,71	1,20	53,40	10357,09	1678,88	346,52
8	4419,80	845,74	164,13	98,86	13,42	1,40	53,30	9351,41	1795,69	349,86
9	4182,23	922,62	142,48	95,32	12,81	1,00	54,10	8999,26	1994,97	309,24
10	4759,94	842,08	171,74	110,89	15,26	1,40	53,20	10044,76	1781,97	365,37
11	4362,88	887,84	154,71	97,81	14,03	1,20	52,80	9133,98	1865,32	326,43
12	4550,20	836,58	169,94	104,89	15,26	1,60	52,50	9463,44	1744,35	356,00
13	4354,18	850,01	158,72	101,74	14,64	1,40	51,20	8815,76	1726,46	323,78
14	4085,78	876,25	141,48	96,68	12,20	1,20	53,40	8656,98	1866,38	302,23
15	4212,00	935,44	144,29	107,44	18,92	1,40	58,70	10045,84	2238,10	347,38
16	4140,58	967,78	137,27	97,34	12,81	0,40	59,20	10007,24	2353,42	335,87
17	4052,01	901,88	139,68	100,64	17,09	1,20	59,30	9809,17	2191,02	341,45

NOTA: Concentraciones en mg/l como ión.

TABLA T-VII/4-2: LSI REAL

Muestra	HCO ₃ mg/l	HCO ₃ ppmCaCO ₃	Ca mg/l	Ca ppmCaCO ₃	STD mg/l	pH	p-HCO ₃	p-Ca	C	pHs	LSIreal
RECHAZO 1	1741,54	1426,32	254,01	633,76	9790,01	7,94	1,54	2,20	2,35	6,09	1,85
RECHAZO 2	1789,81	1465,85	282,78	705,55	10018,64	8,00	1,53	2,15	2,35	6,03	1,97
RECHAZO 3	1568,50	1284,60	287,16	716,47	8916,02	7,98	1,59	2,14	2,35	6,09	1,89
RECHAZO 4	1609,07	1317,83	334,01	833,35	10495,96	7,96	1,58	2,08	2,35	6,01	1,95
RECHAZO 5	1677,15	1373,58	304,21	758,99	9168,04	8,00	1,56	2,12	2,35	6,03	1,97
RECHAZO 6	1664,15	1362,94	338,60	844,80	9863,59	8,05	1,56	2,07	2,35	5,99	2,06
RECHAZO 7	1678,88	1375,00	346,52	864,57	10357,09	8,10	1,56	2,06	2,35	5,97	2,13
RECHAZO 8	1795,69	1470,67	349,86	872,90	9351,41	7,67	1,53	2,06	2,35	5,94	1,73
RECHAZO 9	1994,97	1633,88	309,24	771,54	8999,26	7,83	1,49	2,11	2,35	5,95	1,88
RECHAZO10	1781,97	1459,43	365,37	911,61	10044,76	7,72	1,53	2,04	2,35	5,92	1,80
RECHAZO11	1865,32	1527,70	326,43	814,45	9133,98	7,80	1,51	2,09	2,35	5,95	1,85
RECHAZO12	1744,35	1428,63	356,00	888,22	9463,44	7,62	1,54	2,05	2,35	5,95	1,67
RECHAZO13	1726,46	1413,97	323,78	807,82	8815,76	7,65	1,55	2,09	2,35	5,99	1,66
RECHAZO14	1866,38	1528,57	302,23	754,06	8656,98	7,81	1,51	2,12	2,35	5,99	1,82
RECHAZO15	2238,10	1833,00	347,38	866,71	10045,84	7,86	1,44	2,06	2,35	5,85	2,01
RECHAZO16	2353,42	1927,45	335,87	837,98	10007,24	7,90	1,41	2,08	2,35	5,84	2,06
RECHAZO17	2191,02	1794,45	341,45	851,91	9809,17	7,84	1,45	2,07	2,35	5,86	1,98

B) LSI teórico.

En este caso, los únicos datos de partida serán los correspondientes a las muestras de alimentación y al factor de concentración del sistema de OI (FC). A partir de los cuales, y asumiendo un comportamiento "ideal" de las membranas (apartado 3.4.6, Capítulo 3), lo que supondría rechazos del 100% para (HCO₃)⁻, Ca⁺⁺ y STD, y 0% para el CO₂. Se obtienen muestras "teóricas" de rechazos, para cada una de las cuales, según (Ec.11/3) a (Ec.16/3) del Capítulo 3, se calculan los valores de:

* El contenido en sales totales disueltas, por aplicación de:

$$STD_r = STD_a \times FC \quad (Ec.5/7)$$

* El contenido en iones bicarbonato, por aplicación de:

$$[HCO_3^-]_r = [HCO_3^-]_a \times FC \quad (Ec.6/7)$$

* El contenido en iones calcio, por aplicación de:

$$[Ca^{2+}]_r = [Ca^{2+}]_a \times FC \quad (Ec.7/7)$$

* El contenido en dióxido de carbono, por aplicación de:

$$(CO_2)_r = (CO_2)_a \quad (Ec.8/7)$$

* El valor del pH, por aplicación de:

$$pH_r = 6,3 + \log\left\{\frac{[HCO_3^-]_r}{(CO_2)_r}\right\} \quad (Ec.9/7)$$

A partir de los cuales, y por el mismo procedimiento del apartado A), se obtienen $p-[HCO_3^-]_r$, $p-[Ca^{2+}]_r$, C, pH_s y LSI teórico para cada una de las muestras.

Los cálculos anteriores están reflejados en las tablas T-VII/5-1 y T-VII/5-2.

TABLA T-VII/5-1: LSI TEÓRICO

Muestra	STDa	HCO3a	Caa	R	FC	STDr	HCO3r	Car	HCO3r	Car	HCO3a	pHa	CO2a
	mg/l	mg/l	mg/l	%		mg/l	mg/l	mg/l	ppmCaCO3	ppmCaCO3	ppmCaCO3		mg/l
1	4395,87	770,68	111,82	56,20	2,28	10036,23	1759,54	255,30	1441,07	636,97	631,19	7,79	20,42
2	4364,94	769,46	121,04	57,40	2,35	10246,34	1806,24	284,13	1479,31	708,91	630,19	7,85	17,76
3	3914,11	677,93	124,05	57,00	2,33	9102,58	1576,58	288,49	1291,22	719,78	555,22	7,72	21,11
4	4254,46	643,76	133,47	60,22	2,51	10694,97	1618,30	335,52	1325,39	837,12	527,24	7,65	23,55
5	4208,99	762,75	138,28	54,76	2,21	9303,69	1686,01	305,66	1380,84	762,62	624,69	7,77	21,17
6	4601,37	769,46	156,51	54,00	2,17	10002,98	1672,74	340,24	1369,97	848,90	630,19	7,80	19,93
7	4888,93	785,94	162,12	53,40	2,15	10491,27	1686,57	347,90	1381,30	868,00	643,68	7,87	17,33
8	4419,80	845,74	164,13	53,30	2,14	9464,24	1811,01	351,46	1483,21	876,88	692,66	7,47	46,83
9	4182,23	922,62	142,48	54,10	2,18	9111,61	2010,07	310,41	1646,24	774,48	755,63	7,61	37,01
10	4759,94	842,08	171,74	53,20	2,14	10170,81	1799,32	366,97	1473,64	915,58	689,66	7,52	41,56
11	4362,88	887,84	154,71	52,80	2,12	9243,39	1881,02	327,78	1540,55	817,80	727,14	7,60	36,44
12	4550,20	836,58	169,94	52,50	2,11	9579,37	1761,22	357,77	1442,44	892,63	685,16	7,43	50,79
13	4354,18	850,01	158,72	51,20	2,05	8922,50	1741,82	325,25	1426,55	811,49	696,16	7,49	44,95
14	4085,78	876,25	141,48	53,40	2,15	8767,77	1880,36	303,61	1540,02	757,49	717,65	7,59	36,81
15	4212,00	935,44	144,29	58,70	2,42	10198,55	2264,99	349,37	1855,03	871,68	766,13	7,63	35,83
16	4140,58	967,78	137,27	59,20	2,45	10148,48	2372,01	336,45	1942,68	839,43	792,61	7,70	31,55
17	4052,01	901,88	139,68	59,30	2,46	9955,80	2215,92	343,19	1814,84	856,27	738,64	7,60	37,02

TABLA T-VII/5-2: LSI TEÓRICO

Muestra	HCO ₃ r ppmCaCO ₃	Car ppmCaCO ₃	STDr mg/l	CO ₂ r mg/l	pHr	p-HCO ₃ r	p-Car	C	pHsr	LSI Teórico
1	1441,07	636,97	10036,23	20,42	8,15	1,54	2,20	2,35	6,09	2,06
2	1479,31	708,91	10246,34	17,76	8,22	1,53	2,15	2,35	6,03	2,19
3	1291,22	719,78	9102,58	21,11	8,09	1,59	2,14	2,35	6,08	2,01
4	1325,39	837,12	10694,97	23,55	8,05	1,58	2,08	2,35	6,00	2,05
5	1380,84	762,62	9303,69	21,17	8,11	1,56	2,12	2,35	6,03	2,09
6	1369,97	848,90	10002,98	19,93	8,14	1,56	2,07	2,35	5,98	2,15
7	1381,30	868,00	10491,27	17,33	8,20	1,56	2,06	2,35	5,97	2,23
8	1483,21	876,88	9464,24	46,83	7,80	1,53	2,06	2,35	5,93	1,87
9	1646,24	774,48	9111,61	37,01	7,95	1,48	2,11	2,35	5,94	2,00
10	1473,64	915,58	10170,81	41,56	7,85	1,53	2,04	2,35	5,92	1,93
11	1540,55	817,80	9243,39	36,44	7,93	1,51	2,09	2,35	5,95	1,98
12	1442,44	892,63	9579,37	50,79	7,75	1,54	2,05	2,35	5,94	1,81
13	1426,55	811,49	8922,50	44,95	7,80	1,54	2,09	2,35	5,99	1,82
14	1540,02	757,49	8767,77	36,81	7,92	1,51	2,12	2,35	5,98	1,94
15	1855,03	871,68	10198,55	35,83	8,01	1,43	2,06	2,35	5,84	2,17
16	1942,68	839,43	10148,48	31,55	8,09	1,41	2,08	2,35	5,84	2,25
17	1814,84	856,27	9955,80	37,02	7,99	1,44	2,07	2,35	5,86	2,13

A continuación se muestra la representación gráfica de los valores de LSI obtenidos anteriormente:

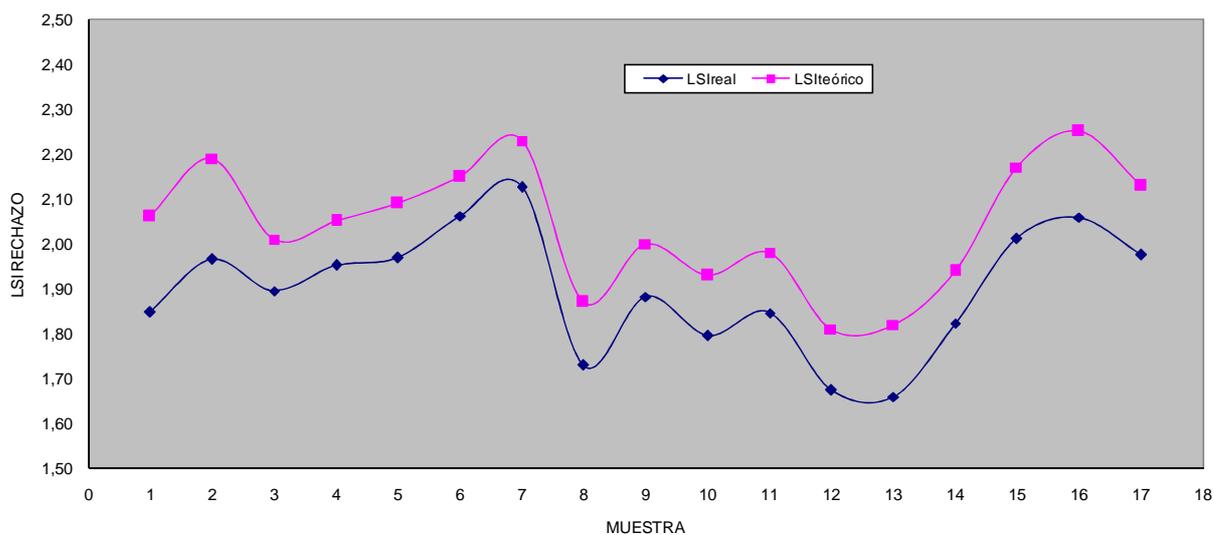


FIGURA F-VII/7: LSI RECHAZO MUESTRAS

3º) Finalmente, el análisis teórico de las muestras nos servirá de base para la determinación correcta, susceptible de aplicación metódica, del comportamiento del sistema de OI a través de la variación con el tiempo de operación de los dos parámetros que caracterizan su rendimiento (Producción y Rechazo de Sales). Cuyo estudio y conclusiones se realizan en los apartados siguientes.

7.3.- Normalización del rendimiento del sistema de OI.

Las condiciones de operación de cualquier planta de desalación, tales como condiciones del agua de alimentación, presión de alimentación, recuperación, etc., varían, normalmente con el tiempo de operación, por lo que los datos de operación son generados en condiciones diferentes (Ver apartados anteriores), estos cambios irregulares imposibilitan un estudio correcto de los datos que influyen en el rendimiento.

Para evaluar el rendimiento del sistema de OI, y por tanto el de la planta, se plantea pues la necesidad de comparar estos datos, en unas mismas condiciones de operación.

7.3.1.- Objetivos.

Con el estudio de normalización de los datos prácticos obtenidos durante los 5 años de evolución de la planta, para unas condiciones fijas de operación del sistema de OI, se pretende conseguir los siguientes objetivos:

a) Mostrar el rendimiento del sistema de OI, a través de la variación con el tiempo de operación de la productividad y rechazo de sales del mismo, factores fundamentales a considerar para el diseño de cualquier planta de desalación por OI, según se ha visto en capítulos anteriores.

b) Una vez alcanzado el anterior objetivo, estudiar los efectos que produce sobre

el rendimiento del sistema, el tiempo de operación, analizando factores tales como la compactación de las membranas, ensuciamiento, envejecimiento, etc. (apartado. 3.4, Capítulo 3).

c) Deducir, finalmente, las oportunas conclusiones prácticas derivadas de los análisis anteriores.

7.3.2.- Método de normalización.

El método usado para normalización de los datos obtenidos a través de las 17 muestras diferentes, fue el de la American Society for Testing and Materials, ASTM (7).

El método consiste en normalizar la producción y el rechazo de sales de una planta de desalación por OI, por medio de las siguientes ecuaciones:

1) Normalización del Flujo de agua Producto (F_p).

$$F_{pn} = (A)(FT_n)(F_{pi}) / (B)(FT_i) \quad (Ec.10/7)$$

2) Normalización del Paso de Sales (P_s).

$$\%P_{sn} = (B)(\%P_{si})(C_{arn})(C_{ai}) / (A)(C_{ari})(C_{an}) \quad (Ec.11/7)$$

donde:

$$A = [P_{an} - (PD_{arn}/2) - P_{pn} - PO_{arn} + PO_{pn}] \quad (Ec.12/7)$$

$$B = [P_{ai} - (PD_{ari}/2) - P_{pi} - PO_{ari} + PO_{pi}] \quad (Ec.13/7)$$

Siendo:

i = Condiciones de operación de la muestra i .

n = Condiciones normales de operación.

P_a = Presión de alimentación (kPa).

P_p = Presión del producto (kPa).

PD_{ar} = Presión diferencial alimentación-rechazo (kPa).

PO_{ar} = Presión osmótica media alimentación-rechazo (kPa).

PO_p = Presión osmótica del producto (kPa).

FT = Factor de corrección por temperatura.

C_a = Concentración de la alimentación (mg/l NaCl).

C_{ar} = Concentración media alimentación-rechazo (mg/l NaCl).

F_p = Flujo de agua producto (m^3/h).

$\%P_s$ = Porcentaje de paso sales respecto a C_a .

Al ser el valor de la temperatura, aproximadamente constante a lo largo del periodo de operación de la planta ($22^\circ C$), se adoptó este valor para las condiciones normales de operación. Y siendo por tanto $FT_n=FT_i$, las (Ec.10/7) y (Ec.11/7) quedan en la forma:

$$F_{pn} = (A/B) \times F_{pi}$$

(Ec.14/7)

$$\%P_{sn} = (B/A) \times (C_{arn} \times C_{ai} / C_{ari} \times C_{an}) \times \%P_{si} \quad (Ec.15/7)$$

7.3.3.- Condiciones normales.

Con el objeto de obtener una más ajustada normalización, se tomaron como condiciones de operación fijas o "normales", las correspondientes a aquella muestra, cuyas condiciones más se aproximan a los valores medios del conjunto (muestra 9), no considerándose las tres primeras muestras, al corresponder al periodo de operación inicial de la planta, normalmente irregular, y a una fase en la que se produjo una ampliación definitiva del sistema (Ver Capítulo 6).

Las condiciones normales de operación adoptadas fueron pues las siguientes (Tablas T-VII/1, T-VII/2 y T-VII/3):

- * Temperatura de operación (T)..... 22°C.
- * Recuperación (R)..... 54,1%.
- * Factor de concentración (FC)..... 2,18.
- * Sales totales disueltas alimentación (STD_a)..... 4.182,23 mg/l.
- * Sales totales disueltas producto (STD_p)..... 95,32 mg/l.
- * Presión de alimentación (P_{an})..... 23,2 kg/cm².
- * Presión diferencial (PD_{arn})..... 2,4 kg/cm².
- * Tiempo de operación (t)..... 25.420 h.

7.3.4.- Procedimiento de cálculo.

De acuerdo al método ASTM, el procedimiento seguido fue el siguiente:

1º) Cálculo de las presiones osmóticas de la alimentación y producto de cada muestra, en kPa, a partir de sus respectivos análisis químicos y aplicando la siguiente ecuación:

$$PO = 8,308 \varphi (T + 273,15) \Sigma \bar{m}_i \quad (Ec16/7)$$

en la cual,

φ = Coeficiente osmótico (0,93 para aguas salobres).

T = Temperatura del agua (22°C).

$\Sigma \bar{m}_i$ = Suma de molalidades de todos los constituyentes iónicos y no iónicos presentes en el agua.

2º) Cálculo de la presión osmótica media alimentación-rechazo, para las condiciones de operación de cada muestra, a partir de:

$$PO_{ar} = PO_a \times FR \quad (Ec. 17/7)$$

En la cual, FR es el factor de recuperación, a calcular a partir de la recuperación y del factor de concentración según

$$FR = (\ln FC) / (R/100) \quad (Ec.18/7)$$

3º) Cálculo de las concentraciones de sales en mg/l NaCl, de la alimentación y producto de cada muestra, aplicando la siguiente ecuación:

$$C = (1000 \times PO) / [0,2654 \times (T + 273,15) + (PO/1000)] \quad (Ec.19/7)$$

4º) Con los resultados anteriores, obtenemos los coeficientes A (Ec.12/7) y B (Ec.13/7). Y aplicando (Ec.14/7) y (Ec.15/7), F_{pn} y P_{sn} .

Los resultados de los sucesivos pasos del procedimiento anterior, se indican en las tablas T-VII/6-1 a T-VII/6-5, para cada una de las muestras consideradas.

TABLA T-VII/6-1: PRESIÓN OSMÓTICA ALIMENTACIÓN

Muestra	mCaa	mMga	mNaa	mKa	mHCO3a	mSO4a	mNO3a	mCla	mSiO2a	Smia	T	Φ_a	POa
	moles/kg	°C		kPa									
4	0,00333	0,00697	0,04293	0,00096	0,01055	0,00707	0,00622	0,03357	0,00047	0,11207	22	0,93	255,571
5	0,00345	0,00587	0,04295	0,00091	0,01250	0,00660	0,00621	0,03059	0,00065	0,10973	22	0,93	250,235
6	0,00391	0,00700	0,04614	0,00092	0,01261	0,00803	0,00665	0,03355	0,00058	0,11939	22	0,93	272,264
7	0,00405	0,00771	0,04897	0,00096	0,01288	0,00914	0,00677	0,03551	0,00055	0,12654	22	0,93	288,569
8	0,00410	0,00748	0,04315	0,00087	0,01386	0,00608	0,00468	0,03647	0,00058	0,11727	22	0,93	267,429
9	0,00356	0,00532	0,04229	0,00081	0,01512	0,00684	0,00590	0,02614	0,00057	0,10655	22	0,93	242,983
10	0,00429	0,00811	0,04787	0,00084	0,01380	0,00593	0,00442	0,04342	0,00053	0,12921	22	0,93	294,658
11	0,00386	0,00695	0,04291	0,00076	0,01455	0,00657	0,00511	0,03249	0,00059	0,11379	22	0,93	259,493
12	0,00424	0,00874	0,04348	0,00086	0,01371	0,00596	0,00410	0,04057	0,00055	0,12221	22	0,93	278,695
13	0,00396	0,00708	0,04263	0,00082	0,01393	0,00641	0,00500	0,03378	0,00063	0,11424	22	0,93	260,520
14	0,00353	0,00494	0,04181	0,00077	0,01436	0,00631	0,00610	0,02643	0,00058	0,10483	22	0,93	239,060
15	0,00360	0,00540	0,04261	0,00066	0,01533	0,00691	0,00600	0,02613	0,00056	0,10720	22	0,93	244,465
16	0,00343	0,00538	0,04217	0,00068	0,01586	0,00571	0,00561	0,02757	0,00057	0,10698	22	0,93	243,963
17	0,00349	0,00478	0,04167	0,00067	0,01478	0,00632	0,00577	0,02568	0,00058	0,10374	22	0,93	236,575

TABLA T-VII/6-2: PRESIÓN OSMÓTICA PRODUCTO

Muestra	mCap	mMgp	mNap	mKp	mHCO3p	mSO4p	mNO3p	mClp	mSiO2p	Smip	T	Φp	POp
	moles/kg	°C		kPa									
4	0,00003	0,00003	0,00153	0,00009	0,00010	0,00001	0,00101	0,00061	0,00000	0,00340	22	0,93	7,761
5	0,00003	0,00003	0,00132	0,00007	0,00012	0,00001	0,00076	0,00060	0,00001	0,00294	22	0,93	6,701
6	0,00004	0,00003	0,00140	0,00007	0,00012	0,00001	0,00080	0,00066	0,00001	0,00313	22	0,93	7,142
7	0,00003	0,00003	0,00140	0,00007	0,00011	0,00001	0,00079	0,00066	0,00000	0,00310	22	0,93	7,069
8	0,00004	0,00005	0,00118	0,00004	0,00022	0,00001	0,00046	0,00070	0,00000	0,00269	22	0,93	6,146
9	0,00003	0,00003	0,00114	0,00003	0,00021	0,00001	0,00057	0,00049	0,00000	0,00250	22	0,93	5,709
10	0,00004	0,00005	0,00136	0,00005	0,00025	0,00001	0,00046	0,00086	0,00000	0,00307	22	0,93	7,012
11	0,00003	0,00005	0,00117	0,00003	0,00023	0,00001	0,00050	0,00061	0,00000	0,00262	22	0,93	5,986
12	0,00004	0,00010	0,00121	0,00004	0,00025	0,00001	0,00041	0,00085	0,00000	0,00290	22	0,93	6,625
13	0,00004	0,00008	0,00117	0,00004	0,00024	0,00001	0,00046	0,00073	0,00001	0,00277	22	0,93	6,309
14	0,00003	0,00003	0,00113	0,00004	0,00020	0,00001	0,00060	0,00048	0,00000	0,00252	22	0,93	5,747
15	0,00004	0,00005	0,00123	0,00003	0,00031	0,00001	0,00061	0,00049	0,00000	0,00277	22	0,93	6,317
16	0,00001	0,00006	0,00122	0,00003	0,00021	0,00001	0,00042	0,00074	0,00000	0,00270	22	0,93	6,165
17	0,00003	0,00004	0,00119	0,00003	0,00028	0,00001	0,00055	0,00051	0,00000	0,00263	22	0,93	6,009

TABLA T-VII/6-3: PRESIÓN OSMÓTICA ALIMENTACIÓN-RECHAZO

Muestra	POa	R	FC	FR	POar
	kPa	%			kPa
4	255,571	60,22	2,5138	1,5307	391,210
5	250,235	54,76	2,2104	1,4485	362,461
6	272,264	54,00	2,1739	1,4380	391,520
7	288,569	53,40	2,1459	1,4299	412,626
8	267,429	53,30	2,1413	1,4286	382,040
9	242,983	54,10	2,1786	1,4394	349,745
10	294,658	53,20	2,1368	1,4272	420,545
11	259,493	52,80	2,1186	1,4219	368,980
12	278,695	52,50	2,1053	1,4180	395,184
13	260,520	51,20	2,0492	1,4012	365,054
14	239,060	53,40	2,1459	1,4299	341,833
15	244,465	58,70	2,4213	1,5065	368,283
16	243,963	59,20	2,4510	1,5143	369,442
17	236,575	59,30	2,4570	1,5159	358,629

TABLA T-VII/6-4: CONCENTRACIONES Y PASO DE SALES

Muestra	POa	Ca	POp	Cp	Ps	POar	Car
	kPa	mg/l NaCl	kPa	mg/l NaCl	%	kPa	mg/l NaCl
4	255,571	3252,02	7,761	99,07	3,05	391,210	4969,39
5	250,235	3184,34	6,701	85,54	2,69	362,461	4605,88
6	272,264	3463,69	7,142	91,17	2,63	391,520	4973,30
7	288,569	3670,36	7,069	90,24	2,46	412,626	5240,00
8	267,429	3402,39	6,146	78,45	2,31	382,040	4853,47
9	242,983	3092,34	5,709	72,88	2,36	349,745	4445,01
10	294,658	3747,52	7,012	89,51	2,39	420,545	5340,03
11	259,493	3301,76	5,986	76,41	2,31	368,980	4688,33
12	278,695	3545,22	6,625	84,57	2,39	395,184	5019,61
13	260,520	3314,79	6,309	80,53	2,43	365,054	4638,68
14	239,060	3042,56	5,747	73,36	2,41	341,833	4344,89
15	244,465	3111,14	6,317	80,64	2,59	368,283	4679,52
16	243,963	3104,77	6,165	78,70	2,53	369,442	4694,17
17	236,575	3011,03	6,009	76,71	2,55	358,629	4557,41

TABLA T-VII/6-5: PRODUCCIÓN Y RECHAZO DE SALES NORMALIZADOS

Muestra	POa	Ca	POp	Cp	Ps	POar	Car	PDar	Pa	Pp	Fp	B	Fpn	Psn	Rsn
	kPa	mg/l NaCl	kPa	mg/l NaCl	%	kPa	mg/l NaCl	kPa	kPa	kPa	m ³ /h	kPa	m ³ /h	%	%
4	255,6	3252,02	7,8	99,07	3,05	391,2	4969,39	129,4	1991,5	20,0	16,26	1523,3	19,50	2,39	97,61
5	250,2	3184,34	6,7	85,54	2,69	362,5	4605,88	139,4	1981,5	20,0	15,18	1536,0	18,05	2,24	97,76
6	272,3	3463,69	7,1	91,17	2,63	391,5	4973,30	199,2	2120,9	20,0	14,76	1616,9	16,67	2,33	97,67
7	288,6	3670,36	7,1	90,24	2,46	412,6	5240,00	278,8	2290,2	20,0	15,24	1725,2	16,14	2,34	97,66
8	267,4	3402,39	6,1	78,45	2,31	382,0	4853,47	248,9	2340,0	20,0	15,18	1819,6	15,24	2,31	97,69
9(normal)	243,0	3092,34	5,7	72,88	2,36	349,7	4445,01	239,0	2310,1	20,0	15,24	1826,6	15,24	2,36	97,64
10	294,7	3747,52	7,0	89,51	2,39	420,5	5340,03	239,0	2340,0	20,0	14,94	1787,0	15,27	2,36	97,64
11	259,5	3301,76	6,0	76,41	2,31	369,0	4688,33	239,0	2210,6	20,0	14,64	1708,1	15,66	2,19	97,81
12	278,7	3545,22	6,6	84,57	2,39	395,2	5019,61	288,8	2489,4	20,0	15,60	1936,5	14,71	2,57	97,43
13	260,5	3314,79	6,3	80,53	2,43	365,1	4638,68	318,6	2529,2	20,0	15,12	1991,1	13,87	2,72	97,28
14	239,1	3042,56	5,7	73,36	2,41	341,8	4344,89	258,9	2539,2	20,0	14,88	2053,7	13,23	2,73	97,27
15	244,5	3111,14	6,3	80,64	2,59	368,3	4679,52	199,2	2509,3	20,0	14,94	2027,8	13,46	2,75	97,25
16	244,0	3104,77	6,2	78,70	2,53	369,4	4694,17	199,2	2589,0	20,0	15,36	2106,1	13,32	2,78	97,22
17	236,6	3011,03	6,0	76,71	2,55	358,6	4557,41	199,2	2638,7	20,0	15,42	2166,5	13,00	2,87	97,13

Finalmente, puede apreciarse la evolución de los valores normalizados obtenidos, en los gráficos de las figuras F-VII/8 y F-VII/9.

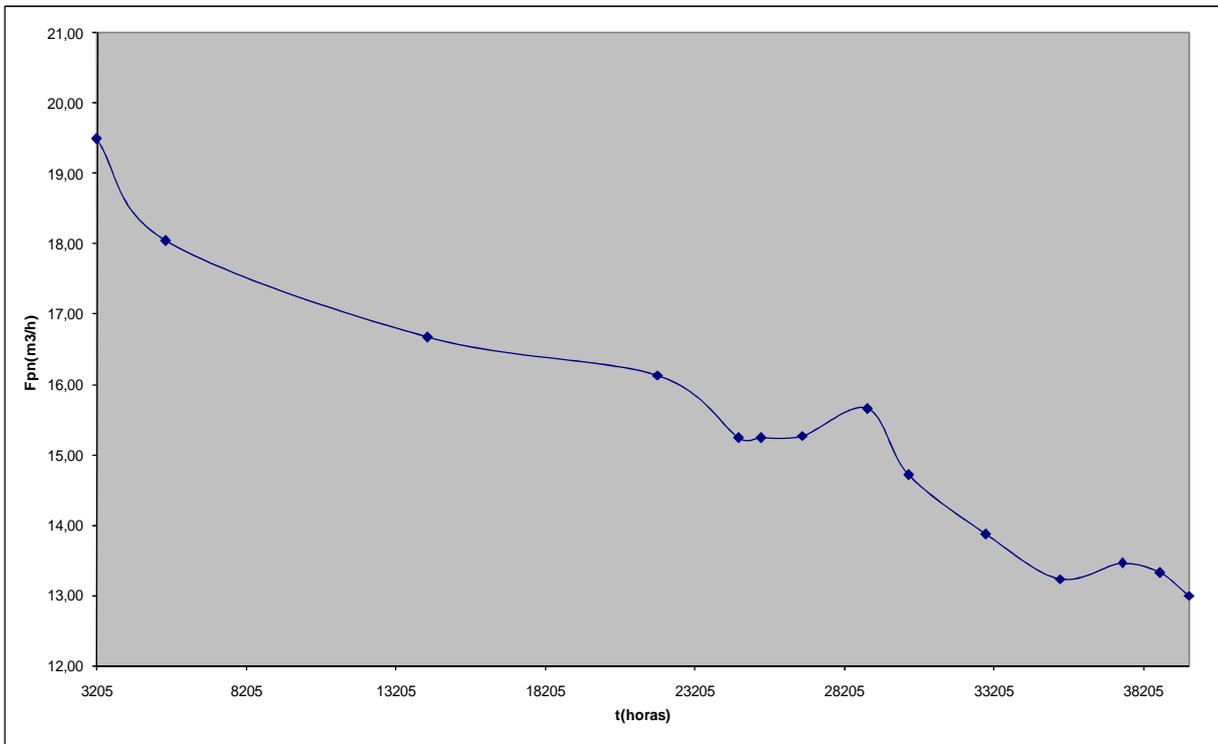


FIGURA F-VII/8: PRODUCCIÓN NORMALIZADA

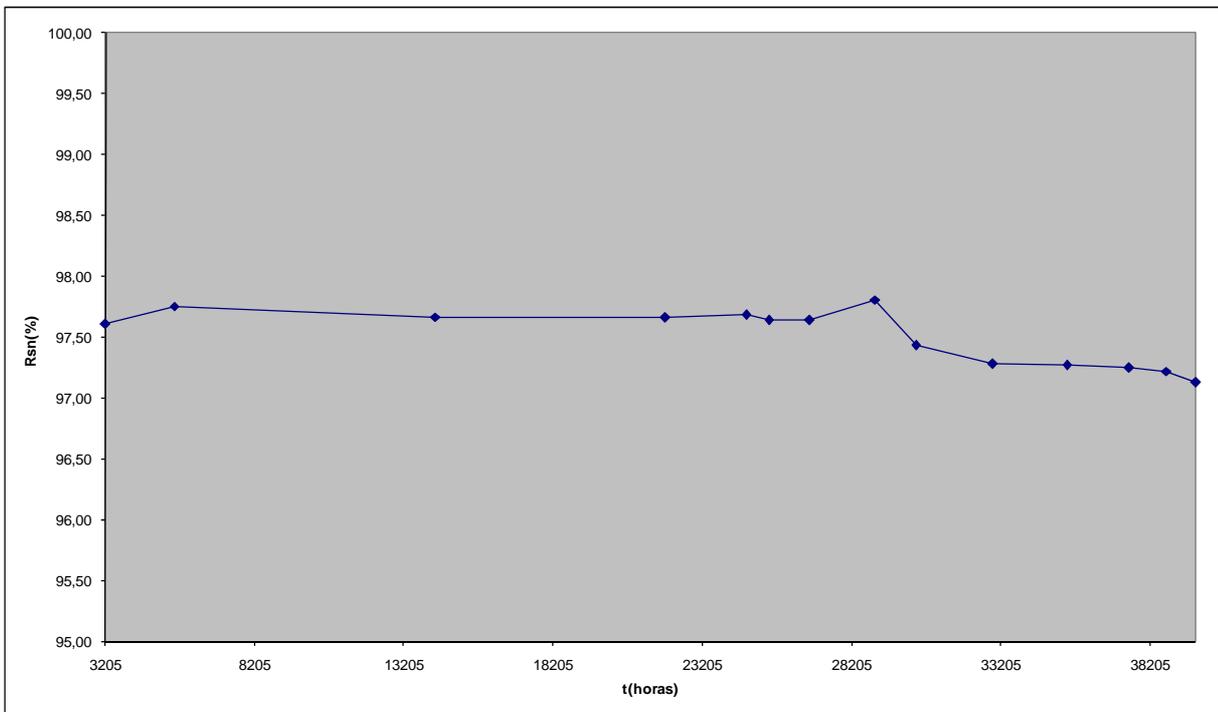
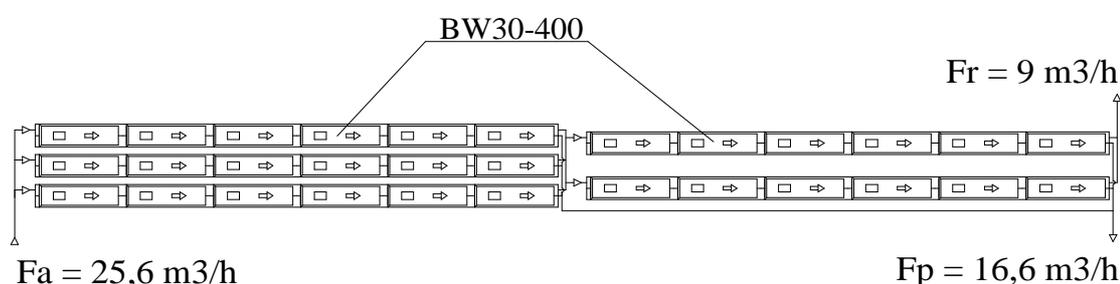


FIGURA F-VII/9: RECHAZO DE SALES NORMALIZADO

7.4.- Estado actual.

La planta desaladora, cuyos datos se han aportado a este trabajo, en su estado actual, y desde Mayo de 2005, dispone de un sistema de OI de arreglo múltiple a dos etapas con disposición 3:2, siendo el número de elementos por módulo de 6, el número total de módulos de la 1ª etapa tres, el de la 2ª dos. El número total de elementos de OI es de $6 \times 5 = 30$ (figura anexa).



La capacidad actual de producción es de 400 m³/día, para una conversión del 65%. El elemento de OI instalado a partir de esa fecha (continúa en operación después de 6 años) es el BW30-400 de Filmtec, que según la tabla T-V/4-2 del Capítulo V, dispone de una superficie de membrana activa de 37 m², bastante superior a la membrana original. Al resultar reducido el consumo de energía, pese al incremento de la producción original (370 m³/día, apartado 6.1, Capítulo VI), la potencia instalada en el equipo de bombeo de alta presión ha pasado de los 40 CV inicialmente instalados, a los 30 CV actuales.

LISTA DE SIMBOLOS

a	= Alimentación
p	= Producto.
r	= Rechazo.
t	= Tiempo de operación.
T	= Temperatura.
s	= Saturación.
i	= Condiciones de operación de la muestra i.
n	= Condiciones normales de operación.
CDV	= Conductividad.
R	= Recuperación o Conversión del sistema de OI.
P	= Presión.
p-Ca	= Parámetro de saturación del CaCO ₃ (Ídem p-[Ca ²⁺] _r).
PD	= Presión diferencial.
p-HCO ₃	= Parámetro de saturación del CaCO ₃ (Ídem p-[HCO ₃ ⁻] _r).
Fp	= Producción
PO	= Presión osmótica.
FT	= Factor de corrección por temperatura.
FR	= Factor de recuperación.
FC	= Factor de concentración.
C	= Concentración.
P _s	= Paso de sales.
φ	= Coeficiente osmótico.
\bar{m}_i	= Molalidad del constituyente i (iónico y no) presente en el agua.
SD	= Índice de ensuciamiento.
LSI	= Índice de saturación de Langelier.
STD	= Sales totales disueltas.

REFERENCIAS

- (1) BW30-8040 de Filmtec Corporation (Dow Chemical Company). *Filmtec Technical Bulletin*. Cleaning Procedures for Filmtec FT30 Elements. (1986).
- (2) Anti-incrustante Flocon 100, Chemical Division of Pfizer Inc.
- (3) Anti-incrustante EL-5600, Water Management Division of Calgon Co.
- (4) Proceedings IDA World Congress, Kuwait (1989). *Desalination*, 76 (1989) 15-26.
- (5) Du Pont Company / Polymer Products Dept. *Permasep Engineering Manual*. Bulletin 502-A (1/12/82). (1982).
- (6) American Society for Testing and Materials (ASTM). *Annual Book*. Designation: D 3739 (1985).
- (7) American Society for Testing and Materials (ASTM). *Annual Book*. Designation: D 4516-85 (1985).

CAPITULO VIII: CONCLUSIONES

8.1.- Conclusiones.

8.1.- Conclusiones.

1.- De la comparación de resultados, LSI reales y teóricos, que se muestra en el gráfico de la figura F-VII/7, se deduce que al existir entre ambos diferencias en torno al 4-11%, resulta bastante conservativo el procedimiento de cálculo teórico. Teniendo en cuenta el fenómeno de polarización de la concentración sobre la superficie de las membranas, es pues correcta la aplicación práctica de este procedimiento al diseño de sistemas de OI aplicados a la desalación de aguas salobres.

2.- Dada la secuencia de limpiezas químicas y resultados de las mismas, resultan correctos el diseño y operación de plantas de desalación de aguas salobres por OI, con aguas de aporte similares a la considerada, sin ácido en la etapa de pretratamiento, con dosificación de anti-incrustante, sin sobrepasar los límites permitidos de los índices de saturación.

3.- Observando el gráfico de las figura F-VII/8, se aprecia que la degradación mecánica (compactación), a la que están sometidos los elementos de OI (membranas), como se indicó en Capítulo V, unida a posibles ensuciamientos, ha hecho que la presión de alimentación necesaria para mantener, durante el tiempo de operación, una producción constante, se incremente paulatinamente, o lo que es lo mismo, manteniendo constante la presión inicial de operación de la planta, se ha producido un descenso paulatino en el flujo de agua producto. La influencia de estos fenómenos, compactación y ensuciamiento, sobre el rendimiento del sistema de OI, ha sido considerada mediante el factor de corrección por tiempo de operación (Ft):

Tiempo de operación	Ft
1 año	0,9
3 años	0,8
5 años	0,7

Valores reales deducidos del gráfico, y suficientemente conservativos comparados con los recomendados por los fabricantes de este tipo de membranas.

4.- Del gráfico de las figura F-VII/9, se desprende la conclusión, por otra parte lógica, de que no existiendo algún tipo de degradación física o química de la membrana y/o de su estructura soporte, elementos y módulos de OI, el rechazo de sales es prácticamente constante a lo largo del tiempo de operación. Del estudio anterior, se han deducido los coeficientes de permeabilidad a los distintos iones, de la membrana empleada. Cuyos valores se indican en la tabla T-V/7 del Capítulo V.

5.- De la aplicación práctica del procedimiento de diseño adoptado, apartado 5.5.8 del Capítulo V, en el que se ha realizado una simulación de las actuales condiciones de operación de la planta, apartado 7.4 del Capítulo VII, se deduce la validez actual del mismo dentro del campo de tratamiento de aguas salobres, y para elementos de OI de arrollamiento en espiral de 4"X40" y de 8"X40", iguales o similares a los aquí contemplados.

6.- Queda abierta la posibilidad de aplicación del mismo a otros modelos de membranas de arrollamiento en espiral, realizando simples cambios en los parámetros característicos de los mismos, de acuerdo a las guías de diseño de los fabricantes y siempre que resulten conocidos los coeficientes de permeabilidad al agua y a las sales, de las membranas en estudio.

ANEXOS

ANEXO 1: Procedimiento de diseño.

ANEXO 2: Evolución de los parámetros característicos de la planta (Tablas).

ANEXO 3: Evolución de los parámetros característicos de la planta (Gráficos).

ANEXO 1: Procedimiento de diseño.

1º) Datos de partida.

- Análisis químico del agua a tratar:

- Cationes en mg/l: Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Bario, Estroncio:
 - . $(Ca)_a = 00000,00$ (1)*
 - . $(Mg)_a = 00000,00$ (2)*
 - . $(Na)_a = 00000,00$ (3)*
 - . $(K)_a = 00000,00$ (4)*
 - . $(Ba)_a = 00000,00$ (5)*
 - . $(Sr)_a = 00000,00$ (6)*

- Aniones en mg/l: Carbonatos (0 mg/l), Bicarbonatos, Sulfatos, Nitratos, Cloruros, Fluoruros:
 - . $(CO_3)_a = 0$
 - . $(HCO_3)_a = 00000,00$ (7)*
 - . $(SO_4)_a = 00000,00$ (8)*
 - . $(NO_3)_a = 00000,00$ (9)*
 - . $(Cl)_a = 00000,00$ (10)*
 - . $(F)_a = 00000,00$ (11)*

- Otros en mg/l: Cloro (0 mg/l), Sílice, Hierro, Manganeso, Aluminio:
 - . $(Cl_2)_a = 0$
 - . $(SiO_2)_a = 000,00$ (12)*
 - . $(Fe)_a = 0,00$ (13)*
 - . $(Mn)_a = 0,00$ (14)*
 - . $(Al)_a = 0,00$ (15)*

- $pH_a (<8) = 0,00$ (16)*

- Temperaturas en °C: Mínima ($T_{\text{mín}}$), Media (T_{med}) y Máxima ($T_{\text{máx}}$):
 - . $T_{\text{mín}} (\geq 10^{\circ}\text{C}) = 00,0^{\circ}\text{C}$ (17)*
 - . $T_{\text{med}} = 00,0^{\circ}\text{C}$ (18)*
 - . $T_{\text{máx}} (\leq 30^{\circ}\text{C}) = 00,0^{\circ}\text{C}$ (19)*

- Procedencia del agua a tratar: Fuente y SDI:
 - . Pozo: Especificar Si o No.
 - . 2º Paso de Sistema de Ol: Especificar Si o No.
 - . $\text{SDI} (<5) = 0,00$. (20)*

- Caudal deseado de agua producto en m^3/hora y en $\text{m}^3/\text{día}$:
 - . $Q_p = 0000,0 \text{ m}^3/\text{h}$. (21)*
 - . $Q = Q_p \times 24 = 00000 \text{ m}^3/\text{día}$. (22)*

2º) Cálculos iniciales.

- Pasar cationes de mg/l a meq/l:
 - . $(\text{meq}/\text{lCa})_a = (\text{Ca})_a \times 2 / 40,08 = 0000,00$
(23)*
 - . $(\text{meq}/\text{lMg})_a = (\text{Mg})_a \times 2 / 24,312 = 0000,00$ (24)*
 - . $(\text{meq}/\text{lNa})'_a = (\text{Na})'_a / 23 = 0000,00$ (25)*
 - . $(\text{meq}/\text{lK})_a = (\text{K})_a / 39,102 = 0000,00$ (26)*
 - . $(\text{meq}/\text{lBa})_a = (\text{Ba})_a \times 2 / 137,34 = 0000,00$ (27)*
 - . $(\text{meq}/\text{lSr})_a = (\text{Sr})_a \times 2 / 87,62 = 0000,00$ (28)*

- Sumar cationes en meq/l:
 - . $(\text{meq}/\text{lCationes})_a = (23)^* + (24)^* + (25)^* + (26)^* + (27)^* + (28)^*$ (29)*

- Pasar aniones de mg/l a meq/l:
 - . $(\text{meq}/\text{lHCO}_3)_a = (\text{HCO}_3)_a / 61 = 0000,00$ (30)*
 - . $(\text{meq}/\text{lSO}_4)_a = (\text{SO}_4)_a \times 2 / 96 = 0000,00$ (31)*
 - . $(\text{meq}/\text{lNO}_3)_a = (\text{NO}_3)_a / 62 = 0000,00$ (32)*

$$\cdot (\text{meq/lCl})'_a = (\text{Cl})'_a / 35,453 = 0000,00 \quad (33)^*$$

$$\cdot (\text{meq/lF})_a = (\text{F})_a / 19 = 0000,00 \quad (34)^*$$

- Sumar aniones en meq/l:

$$\cdot (\text{meq/lAniones})_a = (30)^* + (31)^* + (32)^* + (33)^* + (34)^* \quad (35)^*$$

- Calcular diferencia de sumas de cationes y aniones en meq/l.

$$\cdot (29)^* - (35)^* = 00,00 \quad (36)^*$$

- Añadir meq/l de Sodio, o de Cloruro, para equilibrar el balance de Cationes y Aniones:

. Si $(36)^* \geq 0$,

Entonces:

$$(\text{meq/lCl})_a = (33)^* + (36)^* \quad (37)^*$$

$$(\text{meq/lNa})_a = (25)^* \quad (38)^*$$

$$(\text{Cl})_a = (\text{meq/lCl})_a \times 35,453 = (37)^* \times 35,453 \quad (39)^*$$

$$(\text{Na})_a = (\text{meq/lNa})_a \times 23 = (38)^* \times 23 = (\text{Na})'_a = (3)^* \quad (40)^*$$

. Escribir nuevo análisis balanceado del agua de alimentación en mg/l sustituyendo $(3)^*$ por $(40)^*$ y $(10)^*$ por $(39)^*$:

Cationes en mg/l:

$$\cdot (\text{Ca})_a = 00000,00 \quad (1)^*$$

$$\cdot (\text{Mg})_a = 00000,00 \quad (2)^*$$

$$\cdot (\text{Na})_a = 00000,00 \quad (40)^*$$

$$\cdot (\text{K})_a = 00000,00 \quad (4)^*$$

$$\cdot (\text{Ba})_a = 00000,00 \quad (5)^*$$

$$\cdot (\text{Sr})_a = 00000,00 \quad (6)^*$$

Aniones en mg/l:

$$\cdot (\text{CO}_3)_a = 0$$

$$\cdot (\text{HCO}_3)_a = 00000,00 \quad (7)^*$$

$$\cdot (\text{SO}_4)_a = 00000,00 \quad (8)^*$$

$$\cdot (\text{NO}_3)_a = 00000,00 \quad (9)^*$$

$$\cdot (\text{Cl})_a = 00000,00 \quad (39)^*$$

$$\cdot (\text{F})_a = 00000,00 \quad (11)^*$$

$$\cdot (\text{STD})_a = (1)^* + (2)^* + (40)^* + (4)^* + (5)^* + (6)^* + (7)^* + (8)^* + (9)^* + (39)^* + (11)^* + (12)^* + (13)^* + (14)^* + (15)^* \quad (41)^*$$

Escribiendo debajo: Para equilibrar el balance de cationes y aniones, se han añadido $((36)^* \times 35,453)$ mg/l de cloruros al agua de alimentación.

. Si $(36)^* < 0$:

Entonces:

$$(\text{meq/Cl})_a = (33)^* \quad (42)^*$$

$$(\text{meq/Na})_a = (25)^* + (-36)^* \quad (43)^*$$

$$(\text{Cl})_a = (\text{meq/Cl})_a \times 35,453 = (42)^* \times 35,453 = (\text{Cl})'_a = (10)^* \quad (44)^*$$

$$(\text{Na})_a = (\text{meq/Na})_a \times 23 = (43)^* \times 23 \quad (45)^*$$

. Escribir nuevo análisis balanceado del agua de alimentación en mg/l sustituyendo $(3)^*$ por $(45)^*$ y $(10)^*$ por $(44)^*$:

Cationes en mg/l:

$$\cdot (\text{Ca})_a = 00000,00 \quad (1)^*$$

$$\cdot (\text{Mg})_a = 00000,00 \quad (2)^*$$

$$\cdot (\text{Na})_a = 00000,00 \quad (45)^*$$

$$\cdot (\text{K})_a = 00000,00 \quad (4)^*$$

$$\cdot (\text{Ba})_a = 00000,00 \quad (5)^*$$

$$\cdot (\text{Sr})_a = 00000,00 \quad (6)^*$$

Aniones en mg/l:

$$\cdot (\text{CO}_3)_a = 0$$

$$\cdot (\text{HCO}_3)_a = 00000,00 \quad (7)^*$$

$$\cdot (\text{SO}_4)_a = 00000,00 \quad (8)^*$$

$$\cdot (\text{NO}_3)_a = 00000,00 \quad (9)^*$$

$$\cdot (\text{Cl})_a = 00000,00 \quad (44)^*$$

$$\cdot (\text{F})_a = 00000,00 \quad (11)^*$$

$$\cdot (\text{STD})_a = (1)^* + (2)^* + (45)^* + (4)^* + (5)^* + (6)^* + (7)^* + (8)^* + (9)^* + (44)^* + (11)^* + (12)^* + (13)^* + (14)^* + (15)^* \quad (46)^*$$

Escribiendo debajo: Para equilibrar el balance de cationes y aniones, se han añadido $((-36)^* \times 23)$ mg/l de sodio al agua de alimentación.

3º) Cálculo del nivel máximo de recuperación del sistema de OI para que no haya incrustación de Sílice ($R_1 = R_{\text{máx-SiO}_2}$).

- Pasar a mg/l como CaCO_3 , bicarbonatos $([\text{HCO}_3]_a)$ y calcio $([\text{Ca}]_a)$. .Calculando:

$$[\text{HCO}_3]_a = (\text{HCO}_3)_a \times 0,819 = (7)^* \times 0,819 \quad (47)^*$$

$$\cdot \text{Calculando: } [\text{Ca}]_a = (\text{Ca})_a \times 2,495 = (1)^* \times 2,495 \quad (48)^*$$

- Estimar el contenido en CO_2 a partir del pH_a y de los bicarbonatos $((\text{CO}_2)_a)$:

$$\cdot \text{Calculando: } (\text{CO}_2)_a = [\text{HCO}_3]_a / 10^{(\text{pH}_a - 6,3)} = (47)^* / 10^{(16^* - 6,3)} \quad (49)^*$$

- Calcular $(\text{SiO}_2)_{T_{\text{mín}}} = 4T_{\text{mín}} = 4 \times (17)^* \quad (50)^*$

- Calcular $\text{FC}_{\text{mín-SiO}_2} = (4T_{\text{mín}}) / (\text{SiO}_2)_a = (50)^* / (12)^* \quad (51)^*$

- Calcular $R_{\text{mín-SiO}_2}$ a partir de:

$$\cdot R_{\text{mín-SiO}_2} = 100 \times (\text{FC}_{\text{mín}} - 1) / \text{FC}_{\text{mín}} = 100 \times ((51)^* - 1) / (51)^* \quad (52)^*$$

- Calcular $[\text{HCO}_3]_{r-\text{mín-SiO}_2} = [\text{HCO}_3]_a \times \text{FC}_{\text{mín-SiO}_2} = (47)^* \times (51)^* \quad (53)^*$

- Calcular $\text{pH}_{r-\text{mín-SiO}_2}$ a partir de:

$$\cdot \text{pH}_{r-\text{mín-SiO}_2} = 6,3 + \log([\text{HCO}_3]_{r-\text{mín-SiO}_2} / (\text{CO}_2)_a).$$

$$\cdot \text{pH}_{r-\text{mín-SiO}_2} = 6,3 + \log((53)^* / (49)^*) \quad (54)^*$$

- Calcular C_{pH} a partir de:

. Si $7 \leq \text{pH}_{\text{r-mín-SiO}_2} \leq 7,8$:

$$C_{\text{pH}} = 1 \quad (55)^*$$

. Si $\text{pH}_{\text{r-mín-SiO}_2} < 7$:

$$C_{\text{pH}} = 1,819 - (0,117 \times \text{pH}_{\text{r-mín-SiO}_2}) = 1,819 - (0,117 \times (54)^*) \quad (56)^*$$

. Si $\text{pH}_{\text{r-mín-SiO}_2} > 7,8$:

$$C_{\text{pH}} = 0,47 + 0,0006 \times (e)^{0,87\text{pH}_{\text{r-mín-SiO}_2}}$$

$$C_{\text{pH}} = 0,47 + 0,0006 \times (e)^{0,87 \times (54)^*} \quad (57)^*$$

- Calcular el factor de concentración necesario para conseguir el nivel máximo de concentración de Sílice en el rechazo ($\text{FC}_{\text{máx-SiO}_2}$):

$$\text{FC}_{\text{máx-SiO}_2} = (4T_{\text{mín}}) \times C_{\text{pH}} / (\text{SiO}_2)_a$$

$$\text{FC}_{\text{máx-SiO}_2} = (50)^* \times ((55)^* \text{ o } (56)^* \text{ o } (57)^*) / (12)^* \quad (58)^*$$

- Calcular la conversión (recuperación) necesaria en % para lograr el factor de conversión anterior ($R_1 = R_{\text{máx-SiO}_2}$):

$$R_{\text{máx-SiO}_2} = 100 \times (\text{FC}_{\text{máx-SiO}_2} - 1) / \text{FC}_{\text{máx-SiO}_2}$$

$$R_1 = R_{\text{máx-SiO}_2} = 100 \times ((58)^* - 1) / (58)^* \quad (59)^*$$

4º) Cálculo del nivel de recuperación máximo del sistema de OI a adoptar ($R_{\text{máx-adopt}}$).

4-1) Cálculo del nivel máximo de recuperación del sistema de OI para que, no habiendo incrustación de Sílice, no haya incrustación de Carbonato Cálcico ($R_2 = R_{\text{máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3}$).

Comprobamos el nivel de tendencia a la incrustación de Carbonato Cálcico para la conversión $R_{\text{máx-SiO}_2}$:

- Calcular $[\text{Ca}]_{\text{r-máx-SiO}_2} = [\text{Ca}]_a \times \text{FC}_{\text{máx-SiO}_2}$:

$$. [\text{Ca}]_{r\text{-máx-SiO}_2} = (48)^* \times (58)^* \\ (60)^*$$

- Calcular $[\text{HCO}_3]_{r\text{-máx-SiO}_2} = [\text{HCO}_3]_a \times \text{FC}_{\text{máx-SiO}_2}$:

$$. [\text{HCO}_3]_{r\text{-máx-SiO}_2} = (47)^* \times (58)^* \quad (61)^*$$

- Calcular $\text{pH}_{r\text{-máx-SiO}_2} = 6,3 + \log([\text{HCO}_3]_{r\text{-máx-SiO}_2} / (\text{CO}_2)_a)$:

$$. \text{pH}_{r\text{-máx-SiO}_2} = 6,3 + \log((61)^* / (49)^*) \quad (62)^*$$

- Calcular $\text{p-Ca}_{r\text{-máx-SiO}_2} = \log(10^5 / [\text{Ca}]_{r\text{-máx-SiO}_2})$:

$$. \text{p-Ca}_{r\text{-máx-SiO}_2} = \log(10^5 / (60)^*) \quad (63)^*$$

- Calcular $\text{p-HCO}_3_{r\text{-máx-SiO}_2} = \log(5 \times 10^4 / ([\text{HCO}_3]_{r\text{-máx-SiO}_2}))$:

$$. \text{p-HCO}_3_{r\text{-máx-SiO}_2} = \log(5 \times 10^4 / (61)^*) \quad (64)^*$$

- Calcular $(\text{STD})_{r\text{-máx-SiO}_2} = (\text{STD})_a \times \text{FC}_{\text{máx-SiO}_2}$:

$$. (\text{STD})_{r\text{-máx-SiO}_2} = ((41)^* \text{ o } (46)^*) \times (58)^* \quad (65)^*$$

Utilizar ítem (41)* si mg/l de Cl han sido añadidos para equilibrar el análisis del agua de alimentación.

Utilizar ítem (46)* si mg/l de Na han sido añadidos para equilibrar el análisis del agua de alimentación.

- Cálculo de los índices de saturación del carbonato cálcico:

. Si $(\text{STD})_{r\text{-máx-SiO}_2} \leq 10000$, Calcular Índice de Saturación de Langelier (LSI).

. Si $(\text{STD})_{r\text{-máx-SiO}_2} > 10000$, Calcular Índice de Saturación de Stiff and Davis (S&DSI).

- $(\text{STD})_{r\text{-máx-SiO}_2} \leq 10000$: Índice de saturación de Langelier (LSI):

- Si $(\text{STD})_{r\text{-máx-SiO}_2} \leq 6000$:

$$\begin{aligned} & \cdot \text{Calcular } C_{r\text{-máx-SiO}_2} = ((\log(\text{STD})_{r\text{-máx-SiO}_2} - 1) / 10) - (13,12 \times \log [T_{\text{máx}} + 273,15]) + \\ & 34,46 = ((\log(65)^* - 1) / 10) - (13,12 \times \log [(19)^* + 273,15]) + 34,46 \quad . \quad (66)^* \end{aligned}$$

- Si $6.000 < (\text{STD})_{r\text{-máx-SiO}_2} \leq 10.000$:

$$\cdot \text{Calcular } C_{r\text{-máx-SiO}_2} = 0,2778 - (13,12 \times \log [T_{\text{máx}} + 273,15]) + 34,46.$$

$$\cdot C_{r\text{-máx-SiO}_2} = 0,2778 - (13,12 \times \log [(19)^* + 273,15]) + 34,46 \quad (67)^*$$

- Calcular $\text{pH}_{s_{r\text{-máx-SiO}_2}}$:

$$\cdot \text{pH}_{s_{r\text{-máx-SiO}_2}} = \text{p-Ca}_{r\text{-máx-SiO}_2} + \text{p-HCO}_3_{r\text{-máx-SiO}_2} + C_{r\text{-máx-SiO}_2}$$

$$\cdot \text{pH}_{s_r} = (63)^* + (64)^* + ((66)^* \text{ o } (67)^*) \quad (68)^*$$

- Calcular $\text{LSI}_{r\text{-máx-SiO}_2} = \text{pH}_{r\text{-máx-SiO}_2} - \text{pH}_{s_{r\text{-máx-SiO}_2}}$:

$$\cdot \text{LSI}_{r\text{-máx-SiO}_2} = (62)^* - (68)^* \quad (69)^*$$

- Si $\text{LSI}_{r\text{-máx-SiO}_2} \leq 2,5$. Se adopta $R_2 (R_{\text{máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3}) = R_1 (R_{\text{máx-SiO}_2})$ y se comprueba para esta conversión, el nivel de tendencia a la incrustación de sulfato cálcico.

- Si $\text{LSI}_{r\text{-máx-SiO}_2} > 2,5$. Se reduce el nivel de conversión $R_2 < R_1$ hasta conseguir que el nuevo $\text{LSI}_{r\text{-máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3} \leq 2,5$.

- $(\text{STD})_{r\text{-máx-SiO}_2} > 10000$: Índice de saturación de Stiff and Davis (S&DSI):

- Calcular las concentraciones molales de todos los iones presentes en el agua de alimentación:

$$\cdot (m_{\text{Ca}})_a = (\text{Ca})_a / (40080(((10)^6 - \text{STD}_a) / (10)^6)):$$

$$\cdot (m_{\text{Ca}})_a = (1)^* / (40080(((10)^6 - ((41)^* \text{ o } (46)^*)) / (10)^6)) \quad (70)^*$$

$$\cdot (m_{\text{Mg}})_a = (\text{Mg})_a / (24312(((10)^6 - \text{STD}_a) / (10)^6)):$$

$$\cdot (m_{\text{Mg}})_a = (2)^* / (24312(((10)^6 - ((41)^* \text{ o } (46)^*)) / (10)^6)) \quad (71)^*$$

$$\begin{aligned} \cdot (m_{Na})_a &= (Na)_a / (23000(((10)^6 - STD_a)/(10)^6)): \\ \cdot (m_{Na})_a &= ((40)^* \text{ o } (45)^* / (23000(((10)^6 - ((41)^* \text{ o } (46)^*)/(10)^6))) \end{aligned} \quad (72)^*$$

$$\begin{aligned} \cdot (m_K)_a &= (K)_a / (39102(((10)^6 - STD_a)/(10)^6)): \\ \cdot (m_K)_a &= (4)^* / (39102(((10)^6 - ((41)^* \text{ o } (46)^*)/(10)^6))) \end{aligned} \quad (73)^*$$

$$\begin{aligned} \cdot (m_{Ba})_a &= (Ba)_a / (137340(((10)^6 - STD_a)/(10)^6)): \\ \cdot (m_{Ba})_a &= (5)^* / (137340(((10)^6 - ((41)^* \text{ o } (46)^*)/(10)^6))) \end{aligned} \quad (74)^*$$

$$\begin{aligned} \cdot (m_{Sr})_a &= (Sr)_a / (87620(((10)^6 - STD_a)/(10)^6)): \\ \cdot (m_{Sr})_a &= (6)^* / (87620(((10)^6 - ((41)^* \text{ o } (46)^*)/(10)^6))) \end{aligned} \quad (75)^*$$

$$\begin{aligned} \cdot (m_{HCO_3})_a &= (HCO_3)_a / (61000(((10)^6 - STD_a)/(10)^6)): \\ \cdot (m_{HCO_3})_a &= (7)^* / (61000(((10)^6 - ((41)^* \text{ o } (46)^*)/(10)^6))) \end{aligned} \quad (76)^*$$

$$\begin{aligned} \cdot (m_{SO_4})_a &= (SO_4)_a / (96000(((10)^6 - STD_a)/(10)^6)): \\ \cdot (m_{SO_4})_a &= (8)^* / (96000(((10)^6 - ((41)^* \text{ o } (46)^*)/(10)^6))) \end{aligned} \quad (77)^*$$

$$\begin{aligned} \cdot (m_{NO_3})_a &= (NO_3)_a / (62000(((10)^6 - STD_a)/(10)^6)): \\ \cdot (m_{NO_3})_a &= (9)^* / (62000(((10)^6 - ((41)^* \text{ o } (46)^*)/(10)^6))) \end{aligned} \quad (78)^*$$

$$\begin{aligned} \cdot (m_{Cl})_a &= (Cl)_a / (35453(((10)^6 - STD_a)/(10)^6)): \\ \cdot (m_{Cl})_a &= (39)^* \text{ o } (44)^* / (35453(((10)^6 - ((41)^* \text{ o } (46)^*)/(10)^6))) \end{aligned} \quad (79)^*$$

$$\begin{aligned} \cdot (m_F)_a &= (F)_a / (19000(((10)^6 - STD_a)/(10)^6)): \\ \cdot (m_F)_a &= (11)^* / (19000(((10)^6 - ((41)^* \text{ o } (46)^*)/(10)^6))) \end{aligned} \quad (80)^*$$

- Calcular la fuerza iónica del agua de alimentación:

$$\cdot FI_a = 0,5 \times [4(m_{Ca})_a + 4(m_{Mg})_a + (m_{Na})_a + (m_K)_a + 4(m_{Ba})_a + 4(m_{Sr})_a + (m_{HCO_3})_a + 4(m_{SO_4})_a + (m_{NO_3})_a + (m_{Cl})_a + (m_F)_a]:$$

$$\cdot FI_a = 0,5 \times [4(70)^* + 4(71)^* + (72)^* + (73)^* + 4(74)^* + 4(75)^* + (76)^* + 4(77)^* +$$

$$(78)^* + (79)^* + (80)^* \quad (81)^*$$

- Calcular la fuerza iónica del agua de rechazo:

$$. FI_{r-\text{máx-SiO}_2} = FI_a \times FC_{\text{máx-SiO}_2}:$$

$$. FI_{r-\text{máx-SiO}_2} = (81)^* \times (58)^* \quad (82)^*$$

- Calcular para la temperatura máxima el coeficiente de fuerza iónica ($K_{T_{\text{máx}}}(FI_{r-\text{máx-SiO}_2})$), a partir de:

$$. K_{10^\circ}((82)^*) = 1,3944(82)^{*3} - 4,8733(82)^{*2} + 4,8189(82)^* + 2,28. \quad (83)^*$$

$$. K_{20^\circ}((82)^*) = 1,4389(82)^{*3} - 5,0767(82)^{*2} + 5,0578(82)^* + 2,06. \quad (84)^*$$

$$. K_{25^\circ}((82)^*) = 1,5861(82)^{*3} - 5,4283(82)^{*2} + 5,2222(82)^* + 1,96. \quad (85)^*$$

$$. K_{30^\circ}((82)^*) = 1,3417(82)^{*3} - 4,7350(82)^{*2} + 4,7933(82)^* + 1,87. \quad (86)^*$$

- . Si el valor de $T_{\text{máx}}$, $(19)^*$, es distinto de los anteriores (10° , 20° , 25° y 30°), interpolar entre los inmediatos inferior y superior, para obtener:

$$. K_{T_{\text{máx}}}(FI_{r-\text{máx-SiO}_2}) = K_{T_{\text{máx}}}((82)^*) \quad (87)^*$$

- Calcular $pH_{s_{r-\text{máx-SiO}_2}}$:

$$. pH_{s_{r-\text{máx-SiO}_2}} = p-Ca_{r-\text{máx-SiO}_2} + p-HCO_{3_{r-\text{máx-SiO}_2}} + K_{T_{\text{máx}}}(FI_{r-\text{máx-SiO}_2}):$$

$$. pH_{s_{r-\text{máx-SiO}_2}} = (63)^* + (64)^* + ((83)^* \circ (84)^* \circ (85)^* \circ (86)^* \circ (87)^*). \quad (88)^*$$

- Calcular $S\&DSI_{r-\text{máx-SiO}_2} = pH_{r-\text{máx-SiO}_2} - pH_{s_{r-\text{máx-SiO}_2}}$:

$$. S\&DSI_{r-\text{máx-SiO}_2} = (62)^* - (88)^* \quad (89)^*$$

- Si $S\&DSI_{r-\text{máx-SiO}_2} \leq 2$. Se adopta $R2 (R_{\text{máx-SiO}_2-\text{CaCO}_3}) = R1 (R_{\text{máx-SiO}_2})$ y se comprueba para esta conversión, el nivel de tendencia a la incrustación de sulfato

cálcico.

- Si $S\&DSI_{r-\text{máx-SiO}_2} > 2$. Se reduce el nivel de conversión $R_2 < R_1$ hasta conseguir que el nuevo $S\&DSI_{r-\text{máx-SiO}_2-\text{CaCO}_3} \leq 2$.

4-2) Cálculo del nivel máximo de recuperación del sistema de OI para que, no habiendo incrustación de Sílice y Carbonato Cálcico, no haya incrustación de Sulfato Cálcico ($R_3 = R_{\text{máx-SiO}_2-\text{CaCO}_3-\text{CaSO}_4}$).

Comprobamos el nivel de tendencia a la incrustación de Sulfato Cálcico para la conversión $R_2 = R_{\text{máx-SiO}_2-\text{CaCO}_3}$:

. A partir del valor obtenido de R_2 en %, y de su factor de concentración asociado:

. $FC_{\text{máx-SiO}_2-\text{CaCO}_3} = 100 / (100 - R_{\text{máx-SiO}_2-\text{CaCO}_3})$:

. $FC_{\text{máx-SiO}_2-\text{CaCO}_3} = 100 / (100 - R_2)$ (90)*

- Calcular la concentraciones molares de los iones sulfato y calcio en el agua de rechazo, a partir de:

. $(8)^* \times (90)^* / 96000$.

(91)*

. $(1)^* \times (90)^* / 40080$.

(92)*

- Calcular el producto iónico del sulfato cálcico en el agua de rechazo:

. $PI_{\text{CaSO}_4 r-\text{máx-SiO}_2-\text{CaCO}_3} = (91)^* \times (92)^*$. (93)*

- Calcular la fuerza iónica del agua de rechazo:

. $FI_{r-\text{máx-SiO}_2-\text{CaCO}_3} = (81)^* \times (90)^*$. (94)*

- Calcular el producto de solubilidad del sulfato cálcico en el agua de rechazo:

. $K_{\text{CaSO}_4 r-\text{máx-SiO}_2-\text{CaCO}_3} = 0,0016 (FI_{r-\text{máx-SiO}_2-\text{CaCO}_3})^{(0,6742)}$.

. $K_{\text{CaSO}_4 r-\text{máx-SiO}_2-\text{CaCO}_3} = 0,0016 ((94)^*)^{(0,6742)}$. (95)*

- Si $PI_{CaSO4r-máx-SiO2-CaCO3} \leq 2,5 K_{CaSO4r-máx-SiO2-CaCO3}$. Esto es, $(93)^* \leq 2,5(95)^*$, se adopta $R3 (R_{máx-SiO2-CaCO3-CaSO4}) = R2 (R_{máx-SiO2-CaCO3})$ y se comprueba para esta conversión, el nivel de tendencia a la incrustación de sulfato de bario.
- Si $PI_{CaSO4r-máx-SiO2-CaCO3} > 2,5 K_{CaSO4r-máx-SiO2-CaCO3}$. Se reduce el nivel de conversión $R3 < R2$ hasta conseguir que para la nueva conversión, $PI_{CaSO4r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4} \leq 2,5 K_{CaSO4r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4}$.

4-3) Cálculo del nivel máximo de recuperación del sistema de OI para que, no habiendo incrustación de Sílice, Carbonato Cálcico y Sulfato Cálcico, no haya incrustación de Sulfato de Bario ($R4 = R_{máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4}$).

Comprobamos el nivel de tendencia a la incrustación de Sulfato de Bario para la conversión $R3 = R_{máx-SiO2-CaCO3-CaSO4}$:

. A partir del valor obtenido de R3 en %, y de su factor de concentración asociado:

. $FC_{máx-SiO2-CaCO3-CaSO4} = 100 / (100 - R_{máx-SiO2-CaCO3-CaSO4})$:

. $FC_{máx-SiO2-CaCO3-CaSO4} = 100 / (100 - R3)$ (96)*

- Calcular la concentraciones molares de los iones sulfato y bario en el agua de rechazo, a partir de:

. $(8)^* \times (356)^* / 96000$. (97)*

. $(5)^* \times (356)^* / 137340$. (98)*

- Calcular el producto iónico del sulfato de bario en el agua de rechazo:

. $PI_{BaSO4r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4} = (97)^* \times (98)^*$.
(99)*

- Calcular la fuerza iónica del agua de rechazo:

. $FI_{r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4} = (81)^* \times (96)^*$. (100)*

- Calcular el producto de solubilidad del sulfato de bario en el agua de rechazo:

. $K_{BaSO4r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4} = 0,000000007 (FI_{r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4})^{(0,835)}$.

$$K_{\text{BaSO4r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4}} = 0,000000007 ((100)^*)^{(0,835)}. \quad (101)^*$$

- Si $PI_{\text{BaSO4r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4}} \leq 40 K_{\text{BaSO4r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4}}$. Esto es, $(99)^* \leq 2,5(101)^*$, se adopta $R4 (R_{\text{máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4}}) = R3 (R_{\text{máx-SiO2-CaCO3-CaSO4}})$ y se comprueba para esta conversión, el nivel de tendencia a la incrustación de sulfato de estroncio.
- Si $PI_{\text{BaSO4r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4}} > 40 K_{\text{BaSO4r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4}}$. Se reduce el nivel de conversión $R4 < R3$ hasta conseguir que para la nueva conversión, $PI_{\text{BaSO4r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4}} \leq 2,5 K_{\text{BaSO4r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4}}$.

4-4) Cálculo del nivel máximo de recuperación del sistema de OI para que, no habiendo incrustación de Sílice, Carbonato Cálcico, Sulfato Cálcico y Sulfato de Bario, no haya incrustación de Sulfato de Estroncio ($R5 = R_{\text{máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4-SrSO4}}$).

Comprobamos el nivel de tendencia a la incrustación de Sulfato de Estroncio para la conversión $R4 = R_{\text{máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4}}$:

. A partir del valor obtenido de R4 en %, y de su factor de concentración asociado:

$$FC_{\text{máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4}} = 100 / (100 - R_{\text{máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4}}):$$

$$FC_{\text{máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4}} = 100 / (100 - R4) \quad (102)^*$$

- Calcular la concentraciones molares de los iones sulfato y estroncio en el agua de rechazo, a partir de:

$$(8)^* \times (102)^* / 96000. \quad (103)^*$$

$$(6)^* \times (102)^* / 87620. \quad (104)^*$$

- Calcular el producto iónico del sulfato de estroncio en el agua de rechazo:

$$PI_{\text{SrSO4r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4}} = (103)^* \times (104)^*. \quad (105)^*$$

- Calcular la fuerza iónica del agua de rechazo:

$$FI_{\text{r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4}} = (81)^* \times (102)^*. \quad (106)^*$$

- Calcular el producto de solubilidad del sulfato de estroncio en el agua de rechazo:

$$K_{\text{SrSO}_4\text{-máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4} = 0,00001 (F_{\text{I-r-máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4})^{(0,6916)}$$

$$K_{\text{SrSO}_4\text{-máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4} = 0,00001 ((106)^*)^{(0,6916)}. \quad (107)^*$$
- Si $PI_{\text{SrSO}_4\text{-máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4} \leq 40 K_{\text{SrSO}_4\text{-máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4}$. Esto es, $(105)^* \leq 40(107)^*$, se adopta $R_5 (R_{\text{máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4\text{-SrSO}_4}) = R_4 (R_{\text{máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4})$ y se comprueba para esta conversión, el nivel de tendencia a la incrustación de Fluoruro Cálculo.
- Si $PI_{\text{SrSO}_4\text{-máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4} > 40 K_{\text{SrSO}_4\text{-máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4}$. Se reduce el nivel de conversión $R_5 < R_4$ hasta conseguir que para la nueva conversión, $PI_{\text{SrSO}_4\text{-máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4\text{-SrSO}_4} \leq 2,5 K_{\text{SrSO}_4\text{-máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4\text{-SrSO}_4}$.

4-5) Cálculo del nivel máximo de recuperación del sistema de OI para que, no habiendo incrustación de Sílice, Carbonato Cálculo, Sulfato Cálculo, Sulfato de Bario y Sulfato de Estroncio, no haya incrustación de Fluoruro Cálculo ($R_6 = R_{\text{máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4\text{-SrSO}_4\text{-CaF}_2}$).

Comprobamos el nivel de tendencia a la incrustación de Fluoruro Cálculo para la conversión $R_5 = R_{\text{máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4\text{-SrSO}_4}$:

- . A partir del valor obtenido de R_5 en %, y de su factor de concentración asociado:
- . $FC_{\text{máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-...-SrSO}_4} = 100 / (100 - R_{\text{máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-...-SrSO}_4})$:
- . $FC_{\text{máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-...-SrSO}_4} = 100 / (100 - R_5) \quad (108)^*$

- Calcular la concentraciones molares de los iones fluoruro y calcio en el agua de rechazo, a partir de:
 - . $(11)^* \times (108)^* / 19000 \quad (109)^*$
 - . $(1)^* \times (108)^* / 40080 \quad (110)^*$
- Calcular el producto iónico del fluoruro cálculo en el agua de rechazo:
 - . $PI_{\text{CaF}_2\text{-máx-SiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-CaSO}_4\text{-BaSO}_4\text{-SrSO}_4} = (109)^* \times (110)^* \quad (111)^*$

- Si $PI_{CaF2r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4-SrSO4} \leq 4 \times 10^{(-9)}$. Esto es, $(111)^* \leq 4 \times 10^{(-9)}$, se adopta $R6 (R_{máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4-SrSO4-CaF2}) = R5 (R_{máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4-SrSO4})$.
- Si $PI_{CaF2r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4-SrSO4} > 4 \times 10^{(-9)}$. Se reduce el nivel de conversión $R6 < R5$ hasta conseguir que para la nueva conversión, $PI_{CaF2r-máx-SiO2-CaCO3-CaSO4-BaSO4-SrSO4-CaF2} \leq 4 \times 10^{(-9)}$.
- Recuperación máxima del sistema de OI para que no se prevean incrustaciones:

$$. R6 = R_{máx-adopt} \tag{112}^*$$

4-6) Otros tipos de incrustación.

No han sido considerados. En el caso de resultar positivo alguno de los ítems (13)*, (14)* o (15)*, consultar las guías y recomendaciones de los fabricantes de anti-incrustantes específicos.

5º) Arreglo del Sistema de OI. Condiciones de partida. Conversión del sistema de OI (R_{OI}).

De acuerdo a la recuperación máxima adoptada en el apartado anterior en % ($R_{máx-adopt}$), para evitar incrustaciones, y en función de la máxima salinidad del agua salobre de alimentación al sistema de OI (15.000 mg/l), lo que equivale aproximadamente a considerar que el agua de rechazo del sistema debe presentar un contenido en sales totales disueltas como máximo de 18.000 mg/l, para que no haya algún elemento del sistema que opere con salinidad de entrada superior a 15.000 mg/l.

Entonces, si FC_{OI} es el factor de concentración asociado a la recuperación R_{OI} , deberá cumplirse que: $(STD)_r = (STD)_a \times FC_{OI} \leq 18000 \text{ mg/l}$. Y por tanto:

$$R_{OI} = 100 \times (1 - (1/FC_{OI})) \leq [100 \times (1 - ((STD)_a/18000))]$$

Además, y con objeto de cumplir los condicionantes de la guía del fabricante (Tabla T-V/1), y según la filosofía de diseño propuesta (apartado 5.5.6, Capítulo V): $R_{OI} \geq 10\%$. Por lo que las condiciones límites de partida para el valor de R_{OI} serán las 3 siguientes:

- $R_{OI} \leq R_{\text{máx-adopt}}$:
 - . $R_{OI} \leq (112)^*$.

- $R_{OI} \leq [100 \times (1 - ((\text{STD})_a/18000))]$:
 - . $R_{OI} \leq [100 \times (1 - (((41)^* \text{ o } (46)^*)/18000))]$.

- $R_{OI} \geq 10\%$.

Considerando, por tanto, bajo los condicionantes anteriores, el entero inferior más cercano a $R_{\text{máx-adopt}}$, como valor de entrada de R_{OI} :

$$. R_{OI} = 00. \quad (113)^*$$

En función del valor del SDI del agua de alimentación $(20)^*$, y de los caudales de alimentación (máximo) y de rechazo (mínimo), deberemos considerar los siguientes límites (Figura F-V/22-2, Capítulo V):

- . Si $3 \leq \text{SDI} < 5$ y $R_{OI} > 70$. Se reduce el valor de R_{OI} a 70.
- . Si $1 \leq \text{SDI} < 3$ y $R_{OI} > 74$. Se reduce el valor de R_{OI} a 74.
- . Si $\text{SDI} < 1$ y $R_{OI} > 87$. Se reduce el valor de R_{OI} a 87.

El arreglo del sistema de OI, se realizará de acuerdo a los apartados siguientes:

- **Si $R_{OI} \leq 53$ (%):**
 - . $(113)^* \leq 53$:
 - . Arreglo simple.
 - . N° Etapas de desalación = 1.
 - . N° de elementos por módulo de OI (N_{Em}):

- . Si $SDI < 1$ y $10 \leq (113)^* \leq 20$.
- . Si $1 \leq SDI < 3$ y $10 \leq (113)^* \leq 17$.
- . Si $3 \leq SDI < 5$ y $10 \leq (113)^* \leq 15$.
- . $N_{Em} = 1$ (114)*

- . Si $SDI < 1$ y $20 < (113)^* \leq 25$.
- . Si $1 \leq SDI < 3$ y $17 < (113)^* \leq 25$.
- . Si $3 \leq SDI < 5$ y $15 < (113)^* \leq 25$.
- . $N_{Em} = 2$ (115)*

- . Si $25 < (113)^* \leq 35$:
- . $N_{Em} = 3$ (116)*

- . Si $35 < (113)^* \leq 40$:
- . $N_{Em} = 4$ (117)*

- . Si $40 < (113)^* \leq 45$:
- . $N_{Em} = 5$ (118)*

- . Si $45 < (113)^* \leq 53$:
- . $N_{Em} = 6$ (119)*

- **Si $53 < R_{OI} \leq 58\%$:**

- . $53 < (113)^* \leq 58$:
- . Arreglo múltiple.
- . N° Etapas de desalación = 2.
- . Relación entre etapas: 2:1.
- . N° de elementos por módulo de OI (N_{Em}):
- . $N_{Em} = 6$ (120)*

- **Si $58 < R_{OI} \leq 70$ (%):**

. $58 < (113)^* \leq 70$:

. Arreglo múltiple.

. N° Etapas de desalación = 2.

. Relación entre etapas: 2:1 y/o 3:2.

. N° de elementos por módulo de OI (N_{Em}):

. $N_{Em} = 6$

(121)*

- **Si $70 < R_{OI} \leq 74$ (%) y $SDI < 3$:**

. $70 < (113)^* \leq 74$ y $SDI < 3$:

. Arreglo múltiple.

. N° Etapas de desalación = 2.

. Relación entre etapas: 2:1 y/o 3:2.

. N° de elementos por módulo de OI (N_{Em}):

. $N_{Em} = 6$

(122)*

- **Si $74 < R_{OI} \leq 84$ (%) y $SDI < 1$:**

. $74 < (113)^* \leq 84$ y $SDI < 1$:

. Arreglo múltiple.

. N° Etapas de desalación = 2.

. Relación entre etapas: 2:1 y/o 3:2.

. N° de elementos por módulo de OI (N_{Em}):

. $N_{Em} = 6$

(123)*

- **Si $84 < R_{OI} \leq 87$ (%) y $SDI < 1$:**

. $84 < (113)^* \leq 87$ y $SDI < 1$:

. Arreglo múltiple.

. N° Etapas de desalación = 2.

- . Relación entre etapas: 2:1.
- . N° de elementos por módulo de OI (N_{Em}):
- . $N_{Em} = 6$ (124)*

6º) Elección del elemento a utilizar para el diseño del sistema de OI.

El tipo de elemento de OI a elegir, en principio será el comercializado a nivel industrial, de menor diámetro (4"X40"), y de estos el modelo de menos superficie activa de membrana que contenga (mas económico), p.e. el BW30-4040 de Filmtec, al que corresponde una superficie activa de membrana de $S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$ (Tabla T-V/4-1). Con el que se diseñará el sistema de OI.

Una vez diseñado el sistema con el elemento anterior, y manteniendo su configuración, pueden repetirse los cálculos finales (a partir del apartado 19º) utilizando otro modelo de 4"X40", de mayor contenido de superficie activa, p.e. el BW30LP-4040 ($S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$) de Filmtec. Con objeto de reducir la presión de operación.

Si la capacidad de la planta lo permite, y si el número de módulos de OI de 4" empleados en las distintas etapas de desalación utilizadas, es suficientemente alto. Teniendo en cuenta que, aproximadamente, la productividad de 1 elemento de 8" equivale a la de 4 elementos de 4", mientras que su coste es solo de 2,5 veces el anterior. Por motivos económicos, el diseño se realizará también utilizando elementos de 8"X40", simultáneamente y de forma paralela con el diseño del sistema empleando los elementos de "4X40". Y como aquel, utilizando el modelo de menos superficie activa de membrana que contenga (más económico), p.e. el BW30-330 de Filmtec , al que corresponde una superficie activa de membrana de $S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$ (Tabla T-V/4-2). En este caso, evidentemente, cambiaría la configuración del sistema de OI.

Finalmente, una vez diseñado el sistema con los elementos anteriores, y manteniendo sus configuraciones, pueden repetirse los cálculos finales (a partir del apartado 19º) utilizando otros modelos de 8"X40", de mayor contenido de superficie activa, p.e. el BW30-365 ($S_{E-8} = 34 \text{ m}^2$), el BW30-400 ($S_{E-8} = 37 \text{ m}^2$) y el BW30-440 (S_{E-8}

= 41 m²) de Filmtec. Con objeto de reducir la presión de operación.

Mostrándose la tabla comparativa de los 6 elementos considerados (2 de 4" y 4 de 8"). La decisión final que deberá contemplar, entre otros aspectos, los gastos de inversión, el consumo de energía, desaladora nueva o ampliación de existente, se deja abierta al usuario.

7º) Nº de elementos y de módulos de OI a utilizar.

- Estimar el Flujo de producto máximo por elemento ($Q_{pe-m\acute{a}x}$), en m³/día, en función de la superficie activa del mismo, y del SDI del agua de alimentación (Tablas T-V/1 y T-V/4, y Figura F-V/22-5, Capítulo V):

. Entrar el Elemento de OI a utilizar:

. "4X40". (125.1)*

. Entrar la superficie activa de membrana por elemento de 4", a considerar inicialmente, en m²:

. $S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$. (126.1)*

. $SDI < 1$.

. $Q_{pe-m\acute{a}x-4} = 1,277 \times (126.1)^* = 1,277 \times 6,5 = 8,3 \text{ m}^3/\text{día}$ (127.1)*

. $1 \leq SDI < 3$.

. $Q_{pe-m\acute{a}x-4} = 1,046 \times (126.1)^* = 1,046 \times 6,5 = 6,8 \text{ m}^3/\text{día}$ (128.1)*

. $3 \leq SDI < 5$.

. $Q_{pe-m\acute{a}x-4} = 0,862 \times (126.1)^* = 0,862 \times 6,5 = 5,6 \text{ m}^3/\text{día}$ (129.1)*

- Estimar el Flujo de producto medio por elemento de 4" del sistema de OI ($Q_{pe-med-4}$), en m³/día (Tablas T-V/5 y Figura F-V/22-6, Capítulo V):

- . Si $SDI < 1$ y $10 \leq (113)^* \leq 20$.
 . $Q_{pe-med-4} = Q_{pe-máx-4} = (127.1)^* = 8,3 \text{ m}^3/\text{día}$ (130.1)*

- . Si $1 \leq SDI < 3$ y $10 \leq (113)^* \leq 17$.
 . $Q_{pe-med-4} = Q_{pe-máx-4} = (128.1)^* = 6,8 \text{ m}^3/\text{día}$ (131.1)*

- . Si $3 \leq SDI < 5$ y $10 \leq (113)^* \leq 15$.
 . $Q_{pe-med-4} = Q_{pe-máx-4} = (129.1)^* = 5,6 \text{ m}^3/\text{día}$ (132.1)*

- . Si $SDI < 1$ y $20 < (113)^* \leq 25$.
 . $Q_{pe-med-4} = 0,95Q_{pe-máx-4} = 0,95(127.1)^*$ (133.1)*

- . Si $1 \leq SDI < 3$ y $17 < (113)^* \leq 25$.
 . $Q_{pe-med-4} = 0,95Q_{pe-máx-4} = 0,95(128.1)^*$ (134.1)*

- . Si $3 \leq SDI < 5$ y $15 < (113)^* \leq 25$.
 . $Q_{pe-med-4} = 0,95Q_{pe-máx-4} = 0,95(129.1)^*$ (135.1)*

- . Si $25 < (113)^* \leq 35$.
 . $Q_{pe-med-4} = 0,90Q_{pe-máx-4} = 0,90((127.1)^*o(128.1)^*o(129.1)^*)$ (136.1)*

- . Si $35 < (113)^* \leq 40$.
 . $Q_{pe-med-4} = 0,85Q_{pe-máx-4} = 0,85((127.1)^*o(128.1)^*o(129.1)^*)$ (137.1)*

- . Si $40 < (113)^* \leq 45$.
 . $Q_{pe-med-4} = 0,80Q_{pe-máx-4} = 0,80((127.1)^*o(128.1)^*o(129.1)^*)$ (138.1)*

- . Si $45 < (113)^* \leq 53$.
 . $Q_{pe-med-4} = 0,75Q_{pe-máx-4} = 0,75((127.1)^*o(128.1)^*o(129.1)^*)$ (139.1)*

. Si $53 < (113)^* \leq 87$.

$$. Q_{pe-med-4} = 0,65Q_{pe-máx-4} = 0,65((127.1)^*o(128.1)^*o(129.1)^*) \quad (140.1)^*$$

- Nº de elementos de 4" inicial del sistema de OI ($N_{E-ini-4}$):

$$. N_{E-ini-4} = Q / Q_{pe-med-4} = (22)^* / (130.1)^* \text{ o... } (140.1)^* \quad (141.1)^*$$

- Nº de módulos de 4" inicial del sistema de OI ($N_{m-ini-4}$):

$$. N_{m-ini-4-0} = N_{E-ini-4} / N_{Em-4} = (141.1)^* / (114)^* \text{ o... } (119)^* \quad (142.1)^*$$

$$. N_{m-ini-4} = \text{Valor entero superior más cercano a } N_{m-ini-4-0}. \quad (143.1)^*$$

- Nº de módulos de 4" a adoptar (N_{m-4}):

. **Si $(113)^* \leq 53$:**

$$. \text{Entrar valor de } N_{m-4} \geq N_{m-ini-4} = (143.1)^* \text{ (en principio igual)} \quad (144.1)^*$$

. Si $N_{m-4} = 4$ o $N_{m-4} \geq 8$: Se realiza el diseño simultáneamente con el elemento de OI de 8"X40", de $S_{E-8}=31 \text{ m}^2$. Se repiten paralelamente los apartados anteriores, de esta forma:

. Entrar el Elemento de OI a utilizar:

$$. \text{"8X40"} \quad (125.2)^*$$

. Entrar la superficie activa de membrana por elemento de 8", a considerar inicialmente, en m^2 :

$$. S_{E-8} = 31 \text{ m}^2. \quad (126.2)^*$$

. $SDI < 1$.

$$. Q_{pe-máx-8} = 1,065 \times (126.2)^* = 1,065 \times 31 = 33 \text{ m}^3/\text{día} \quad (127.2)^*$$

. $1 \leq \text{SDI} < 3$.

. $Q_{\text{pe-máx-8}} = 0,903 \times (126.2)^* = 0,903 \times 31 = 28 \text{ m}^3/\text{día}$ (128.2)*

. $3 \leq \text{SDI} < 5$.

. $Q_{\text{pe-máx-8}} = 0,71 \times (126.2)^* = 0,71 \times 31 = 22 \text{ m}^3/\text{día}$ (129.2)*

- Estimar el Flujo de producto medio por elemento de 8" del sistema de OI ($Q_{\text{pe-med-8}}$), en $\text{m}^3/\text{día}$:

. Si $\text{SDI} < 1$ y $10 \leq (113)^* \leq 20$.

. $Q_{\text{pe-med-8}} = Q_{\text{pe-máx-8}} = (127.2)^* = 33 \text{ m}^3/\text{día}$ (130.2)*

. Si $1 \leq \text{SDI} < 3$ y $10 \leq (113)^* \leq 17$.

. $Q_{\text{pe-med-8}} = Q_{\text{pe-máx-8}} = (128.2)^* = 28 \text{ m}^3/\text{día}$ (131.2)*

. Si $3 \leq \text{SDI} < 5$ y $10 \leq (113)^* \leq 15$.

. $Q_{\text{pe-med-8}} = Q_{\text{pe-máx-8}} = (129.2)^* = 22 \text{ m}^3/\text{día}$ (132.2)*

. Si $\text{SDI} < 1$ y $20 < (113)^* \leq 25$.

. $Q_{\text{pe-med-8}} = 0,95Q_{\text{pe-máx-8}} = 0,95(127.2)^*$ (133.2)*

. Si $1 \leq \text{SDI} < 3$ y $17 < (113)^* \leq 25$.

. $Q_{\text{pe-med-8}} = 0,95Q_{\text{pe-máx-8}} = 0,95(128.2)^*$ (134.2)*

. Si $3 \leq \text{SDI} < 5$ y $15 < (113)^* \leq 25$.

. $Q_{\text{pe-med-8}} = 0,95Q_{\text{pe-máx-8}} = 0,95(129.2)^*$ (135.2)*

. Si $25 < (113)^* \leq 35$:

. $Q_{\text{pe-med-8}} = 0,90Q_{\text{pe-máx-8}} = 0,90((127.2)^* \text{ o } (128.2)^* \text{ o } (129.2)^*)$ (136.2)*

. Si $35 < (113)^* \leq 40$:

. $Q_{\text{pe-med-8}} = 0,85Q_{\text{pe-máx-8}} = 0,85((127.2)^* \text{ o } (128.2)^* \text{ o } (129.2)^*)$ (137.2)*

. Si $40 < (113)^* \leq 45$:

$$. Q_{pe-med-8} = 0,80Q_{pe-máx-8} = 0,80((127.2)^*o(128.2)^*o(129.2)^*) \quad (138.2)^*$$

. Si $45 < (113)^* \leq 53$:

$$. Q_{pe-med-8} = 0,75Q_{pe-máx-8} = 0,75((127.2)^*o(128.2)^*o(129.2)^*) \quad (139.2)^*$$

. Si $53 < (113)^* \leq 87$:

$$. Q_{pe-med-8} = 0,65Q_{pe-máx-8} = 0,65((127.2)^*o(128.2)^*o(129.2)^*) \quad (140.2)^*$$

- Nº de elementos de 8" inicial del sistema de OI ($N_{E-ini-8}$):

$$. N_{E-ini-8} = Q / Q_{pe-med-8} = (22)^* / (130.2)^* \text{ o... } (140.2)^* \quad (141.2)^*$$

- Nº de módulos de 8" inicial del sistema de OI ($N_{m-ini-8}$):

$$. N_{m-ini-8-0} = N_{E-ini-8} / N_{Em-8} = (141.2)^* / (114)^* \text{ o... } (119)^* \quad (142.2)^*$$

$$. N_{m-ini-8} = \text{Valor entero superior más cercano a } N_{m-ini-8-0} \quad (143.2)^*$$

- Nº de módulos de 8" a adoptar (N_{m-8}):

. **Si $(113)^* \leq 53$:**

$$. \text{Entrar valor de } N_{m-8} \geq N_{m-ini-8} = (143.2)^* \text{ (en principio igual)} \quad (144.2)^*$$

. **Si $53 < (113)^* \leq 58$ (Relación entre etapas 2:1). Elementos 4"X40".**

$$. \text{Entrar valor entero superior mas cercano a } N_{m-ini-4} / 3 \quad (145.1)^*$$

$$. N_{m-4} = 3 \times (145.1)^* \quad (146.1)^*$$

. Nº de módulos de la 1ª etapa (N_{m-1e-4}):

$$. N_{m-1e-4} = 2 \times (145.1)^* \quad (147.1)^*$$

. Nº de módulos de la 2ª etapa (N_{m-2e-4}):

$$. N_{m-2e-4} = 1 \times (145.1)^* \quad (148.1)^*$$

. Si $N_{m-2e-4} = 4$ o $N_{m-2e-4} \geq 8$. Se realiza el diseño simultáneamente y de una forma paralela, con el elemento de OI de 8"X40", de $S_{E-8}=31 \text{ m}^2$. Repitiéndose paralelamente los apartados anteriores:

. Si $53 < (113)^* \leq 58$ (Relación entre etapas 2:1). Elementos 8"X40".

. Entrar valor entero superior mas cercano a $N_{m-ini-8} / 3$ (145.2)*

. $N_{m-8} = 3 \times (145.2)^*$ (146.2)*

. N° de módulos de la 1ª etapa (N_{m-1e-8}):

. $N_{m-1e-8} = 2 \times (145.2)^*$ (147.2)*

. N° de módulos de la 2ª etapa (N_{m-2e-8}):

. $N_{m-2e-8} = 1 \times (145.2)^*$ (148.2)*

. Si $58 < (113)^* \leq 84$, y relación entre etapas 2:1. Elementos 4"X40".

. Entrar valor entero superior más cercano a $N_{m-ini-4} / 3$ (149.1)*

. $N_{m-4} = 3 \times (149.1)^*$ (150.1)*

. N° de módulos de la 1ª etapa (N_{m-1e-4}):

. $N_{m-1e-4} = 2 \times (149.1)^*$ (151.1)*

. N° de módulos de la 2ª etapa (N_{m-2e-4}):

. $N_{m-2e-4} = 1 \times (149.1)^*$ (152.1)*

. Si $N_{m-2e-4} = 4$ o $N_{m-2e-4} \geq 8$. Se realiza el diseño simultáneamente y de una forma paralela, con el elemento de OI 8"X40", de $S_{E-8}=31 \text{ m}^2$. Repitiéndose paralelamente los apartados anteriores:

. Si $58 < (113)^* \leq 84$, y relación entre etapas 2:1. Elementos 8"X40".

. Entrar valor entero superior más cercano a $N_{m-ini-8} / 3$ (149.2)*

. $N_{m-8} = 3 \times (149.2)^*$ (150.2)*

. N° de módulos de la 1ª etapa (N_{m-1e-8}):

. $N_{m-1e-8} = 2 \times (149.2)^*$ (151.2)*

. N° de módulos de la 2ª etapa (N_{m-2e-8}):

$$. N_{m-2e-8} = 1 \times (149.2)^* \quad (152.2)^*$$

. Si $58 < (113)^* \leq 84$, y relación entre etapas 3:2. Elementos 4"X40".

. Entrar valor entero superior más cercano a $N_{m-ini-4} / 5$ (153.1)*

$$. N_{m-4} = 5 \times (153.1)^* \quad (154.1)^*$$

. N° de módulos de la 1ª etapa (N_{m-1e-4}):

$$. N_{m-1e-4} = 3 \times (153.1)^* \quad (155.1)^*$$

. N° de módulos de la 2ª etapa (N_{m-2e-4}):

$$. N_{m-2e-4} = 2 \times (153.1)^* \quad (156.1)^*$$

. Si $N_{m-2e-4} = 8$ o $N_{m-2e-4} \geq 16$. Se realiza el diseño simultáneamente y de una forma paralela, con el elemento de OI de 8"X40", de $S_{E-8}=31 \text{ m}^2$. Repitiéndose paralelamente los apartados anteriores:

. Si $58 < (113)^* \leq 84$, y relación entre etapas 3:2. Elementos 8"X40".

. Entrar valor entero superior más cercano a $N_{m-ini-8} / 5$ (153.2)*

$$. N_{m-8} = 5 \times (153.2)^* \quad (154.2)^*$$

. N° de módulos de la 1ª etapa (N_{m-1e-8}):

$$. N_{m-1e-8} = 3 \times (153.2)^* \quad (155.2)^*$$

. N° de módulos de la 2ª etapa (N_{m-2e-8}):

$$. N_{m-2e-8} = 2 \times (153.2)^* \quad (156.2)^*$$

. Si $84 < (113)^* \leq 87$ (Relación entre etapas 2:1). Elementos 4"X40".

. Entrar valor entero superior más cercano a $N_{m-ini-4} / 3$ (157.1)*

$$. N_{m-4} = 3 \times (157.1)^* \quad (158.1)^*$$

. N° de módulos de la 1ª etapa (N_{m-1e-4}):

$$. N_{m-1e-4} = 2 \times (157.1)^* \quad (159.1)^*$$

. N° de módulos de la 2ª etapa (N_{m-2e-4}):

$$. N_{m-2e-4} = 1 \times (157.1)^* \quad (160.1)^*$$

. Si $N_{m-2e-4} = 4$ o $N_{m-2e-4} \geq 8$. Se realiza el diseño simultáneamente y de una forma paralela, con el elemento de OI de 8"X40", de $S_{E-8}=31 \text{ m}^2$. Repitiéndose paralelamente los apartados anteriores:

. **Si $84 < (113)^* \leq 87$ (Relación entre etapas 2:1). Elementos 8"X40".**

$$. \text{Entrar valor entero superior más cercano a } N_{m-ini-8} / 3 \quad (157.2)^*$$

$$. N_{m-8} = 3 \times (157.2)^* \quad (158.2)^*$$

. N° de módulos de la 1ª etapa (N_{m-1e-8}):

$$. N_{m-1e-8} = 2 \times (157.2)^* \quad (159.2)^*$$

. N° de módulos de la 2ª etapa (N_{m-2e-8}):

$$. N_{m-2e-8} = 1 \times (157.2)^* \quad (160.2)^*$$

- N° de elementos de 4"X40" del sistema de OI a adoptar (N_{E-4}):

$$. N_{E-4} = N_{m-4} \times N_{Em-4}.$$

$$. \text{Siendo } N_{m-4} = (144.1)^* \circ (146.1)^* \circ (150.1)^* \circ (154.1)^* \circ (158.1) \quad (161.1)^*$$

$$. \text{Siendo } N_{Em-4} = (114)^* \circ (115)^* \circ (116)^* \circ (117)^* \circ (118)^* \circ (119)^* \quad (162.1)^*$$

$$. N_{E-4} = (161.1)^* \times (162.1)^* \quad (163.1)^*$$

- N° de elementos de 8"X40" del sistema de OI a adoptar (N_{E-8}):

$$. N_{E-8} = N_{m-8} \times N_{Em-8}.$$

$$. \text{Siendo } N_{m-8} = (144.2)^* \circ (146.2)^* \circ (150.2)^* \circ (154.2)^* \circ (158.2) \quad (161.2)^*$$

$$. \text{Siendo } N_{Em-8} = (114)^* \circ (115)^* \circ (116)^* \circ (117)^* \circ (118)^* \circ (119)^* \quad (162.2)^*$$

$$. N_{E-8} = (161.2)^* \times (162.2)^* \quad (163.2)^*$$

8º) Comprobaciones y ajustes del sistema de OI.

- En función de Q_p , (21)*, producción en m^3/h , y R_{OI} , (113)*, recuperación del sistema de OI en %, determinar el flujo de rechazo del sistema de OI (Q_r), y comprobar que el flujo de rechazo del módulo más desfavorable (Q_{rm}) cumple los mínimos de la guía del fabricante:

. Calcular el flujo de alimentación del sistema de OI (Q_a) (m^3/h):

. $Q_a = 100(Q_p / R_{OI})$.

. $Q_a = 100 \times (21)^* / (113)^*$ (164)*

. Calcular el flujo de rechazo del sistema de OI (Q_r):

. $Q_r = Q_a - Q_p$.

. $Q_r = (164)^* - (21)^*$ (165)*

- **Si $R_{OI} \leq 53$:**

. Calcular el flujo de rechazo por módulo de 4"o de 8" del sistema de OI (Q_{rm-4} , Q_{rm-8}):

. $Q_{rm} = (Q_r / N_m)$.

. $Q_{rm-4} = (165)^* / (144.1)^*$ (166.1)*

. $Q_{rm-8} = (165)^* / (144.2)^*$ (166.2)*

. Si $SDI < 1$:

. Para el elemento de 4"X40": $Q_{rm-4} \geq Q_{rm-min-4} = 0,5 m^3/h$. (167.1)*

. Para el elemento de 8"X40": $Q_{rm-8} \geq Q_{rm-min-8} = 1,8 m^3/h$. (167.2)*

. Para (167.1)*:

. Verificar que: $(166.1)^* \geq 0,5$ (168.1)*

. Y Si $(166.1)^* < 0,5$:

Reducir el nivel de recuperación $R_{OI-4} = R_{OI-1}$, y recalculer el sistema desde el apartado 5º, entrando con el nuevo valor R_{OI-1} en (113)*, y así sucesivamente hasta lograr que $(166.1)^* \geq 0,5$.

. Para (167.2)*:

. Verificar que: $(166.2)^* \geq 1,8$ (168.2)*

. Y Si $(166.2)^* < 1,8$:

Reducir el nivel de recuperación $R_{OI-8} = R_{OI-1}$, y recalculer el sistema desde el apartado 5º, entrando con el nuevo valor R_{OI-1} en (113)*, y así sucesivamente hasta lograr que $(166.2)^* \geq 1,8$.

. Si $1 \leq SDI < 5$:

. Para el elemento de 4"X40": $Q_{rm-4} \geq Q_{rm-mín-4} = 0,9 \text{ m}^3/\text{h}$. (169.1)*

. Para el elemento de 8"X40": $Q_{rm-8} \geq Q_{rm-mín-8} = 3,6 \text{ m}^3/\text{h}$. (169.2)*

. Para (169.1)*:

. Verificar que: $(166.1)^* \geq 0,9$ (170.1)*

. Y Si $(166.1)^* < 0,9$:

Reducir el nivel de recuperación $R_{OI-4} = R_{OI-1}$, y recalculer el sistema desde el apartado 5º, entrando con el nuevo valor R_{OI-1} en (113)*, y así sucesivamente hasta lograr que $(166.1)^* \geq 0,9$.

. Para (169.2)*:

. Verificar que: $(166.2)^* \geq 3,6$ (170.2)*

. Y Si $(166.2)^* < 3,6$:

Reducir el nivel de recuperación $R_{OI-8} = R_{OI-1}$, y recalculer el sistema desde el apartado 5º, entrando con el nuevo valor R_{OI-1} en (113)*, y así sucesivamente hasta lograr que $(166.2)^* \geq 3,6$.

- **Si $53 < R_{OI} \leq 87$:**

. Calcular la producción media por elemento de 4" o de 8" del sistema de OI, en m^3/h :

$$. Q_p / N_{E-4} = (21)^* / (163.1)^* \quad (171.1)^*$$

$$. Q_p / N_{E-8} = (21)^* / (163.2)^* \quad (171.2)^*$$

. Calcular la producción máxima por elemento de 4" o de 8" del sistema de OI, en m³/h:

$$. (Q_p / N_{E-4}) / 0,65 = (171.1)^* / 0,65 \quad (172.1)^*$$

$$. (Q_p / N_{E-8}) / 0,65 = (171.2)^* / 0,65 \quad (172.2)^*$$

. Calcular el flujo de agua producto de la 1ª etapa del sistema con módulos de 4" o de 8", en m³/h (Q_{p-1e-4} , Q_{p-1e-8}):

$$. Q_{p-1e-4} = N_{m-1e-4} \times 6 \times 0,75 \times (172.1)^*$$

$$. Q_{p-1e-8} = N_{m-1e-8} \times 6 \times 0,75 \times (172.2)^*$$

$$. Q_{p-1e-4} = 4,5 \times ((147.1)^* \text{o} (151.1)^* \text{o} (155.1) \text{o} (159.1)^*) \times (172.1)^*$$

$$. \text{Valor } Q_{p-1e-4} \quad (173.1)^*$$

$$. Q_{p-1e-8} = 4,5 \times ((147.2)^* \text{o} (151.2)^* \text{o} (155.2) \text{o} (159.2)^*) \times (172.2)^*$$

$$. \text{Valor } Q_{p-1e-8} \quad (173.2)^*$$

. Calcular el flujo de rechazo de la 1ª etapa del sistema con módulos de 4" o de 8", en m³/h (Q_{r-1e-4} , Q_{r-1e-8}):

$$. Q_{r-1e-4} = Q_a - Q_{p-1e-4}$$

$$. Q_{r-1e-8} = Q_a - Q_{p-1e-8}$$

$$. Q_{r-1e-4} = (164)^* - (173.1)^* \quad (174.1)^*$$

$$. Q_{r-1e-8} = (164)^* - (173.2)^* \quad (174.2)^*$$

. Calcular el flujo de rechazo por módulo de 4" o de 8" de la 1ª etapa del sistema, en m³/h ($Q_{rm-1e-4}$, $Q_{rm-1e-8}$):

$$. Q_{rm-1e-4} = Q_{r-1e-4} / N_{m-1e-4}$$

$$. Q_{rm-1e-8} = Q_{r-1e-8} / N_{m-1e-8}.$$

$$. Q_{rm-1e-4} = (174.1)^* / ((147.1)^*o(151.1)^*o(155.1)o(159.1)^*) \times (172.1)^*.$$

$$. \text{Valor } Q_{rm-1e-4} \quad (175.1)^*$$

$$. Q_{rm-1e-8} = (174.2)^* / ((147.2)^*o(151.2)^*o(155.2)o(159.2)^*) \times (172.2)^*.$$

$$. \text{Valor } Q_{rm-1e-8} \quad (175.2)^*$$

. Calcular el flujo de rechazo por módulo de 4" o de 8" de la 2ª etapa del sistema, en m³/h ($Q_{rm-2e-4}$, $Q_{rm-2e-8}$):

$$. Q_{rm-2e-4} = Q_r / N_{m-2e-4}.$$

$$. Q_{rm-2e-8} = Q_r / N_{m-2e-8}.$$

$$. Q_{rm-2e-4} = (165)^* / ((148.1)^*o(152.1)^*o(156.1)o(160.1)^*) \quad (176.1)^*$$

$$. Q_{rm-2e-8} = (165)^* / ((148.2)^*o(152.2)^*o(156.2)o(160.2)^*) \quad (176.2)^*$$

. Si SDI < 1:

$$. \text{Para el elemento de 4"X40": } Q_{rm-4} \geq Q_{rm-\text{mín-4}} = 0,5 \text{ m}^3/\text{h}. \quad (167.1)^*$$

$$. \text{Para el elemento de 8"X40": } Q_{rm-8} \geq Q_{rm-\text{mín-8}} = 1,8 \text{ m}^3/\text{h}. \quad (167.2)^*$$

. Para (167.1)*:

$$. \text{Verificar que: } (175.1)^* \geq 0,5 \text{ y } (176.1)^* \geq 0,5 \quad (177.1)^*$$

. Y Si $(175.1)^* < 0,5$ o $(176.1)^* < 0,5$:

Reducir el nivel de recuperación $R_{OI-4} = R_{OI-1}$, y recalculer el sistema desde el apartado 5º, entrando con el nuevo valor R_{OI-1} en (113), y así sucesivamente hasta lograr que $(175.1)^* \geq 0,5$ y $(176.1)^* \geq 0,5$.*

. Para (167.2)*:

$$. \text{Verificar que: } (175.2)^* \geq 1,8 \text{ y } (176.2)^* \geq 1,8 \quad (177.2)^*$$

. Y Si $(175.2)^* < 1,8$ o $(176.2)^* < 1,8$:

Reducir el nivel de recuperación $R_{OI-8} = R_{OI-1}$, y recalculer el sistema desde el

apartado 5º, entrando con el nuevo valor R_{OI-1} en (113)*, y así sucesivamente hasta lograr que $(175.2)^* \geq 1,8$ y $(176.2)^* \geq 1,8$.

. Si $1 \leq SDI < 5$:

. Para el elemento de 4"X40": $Q_{rm-4} \geq Q_{rm-min-4} = 0,9 \text{ m}^3/\text{h}$. (169.1)*

. Para el elemento de 8"X40": $Q_{rm-8} \geq Q_{rm-min-8} = 3,6 \text{ m}^3/\text{h}$. (169.2)*

. Para (169.1)*:

. Verificar que: $(175.1)^* \geq 0,9$ y $(176.1)^* \geq 0,9$ (178.1)*

. Y Si $(175.1)^* < 0,9$ o $(176.1)^* < 0,5$:

Reducir el nivel de recuperación $R_{OI-4} = R_{OI-1}$, y recalculer el sistema desde el apartado 5º, entrando con el nuevo valor R_{OI-1} en (113)*, y así sucesivamente hasta lograr que $(175.1)^* \geq 0,9$ y $(176.1)^* \geq 0,9$.

. Para (169.2)*:

. Verificar que: $(175.2)^* \geq 1,8$ y $(176.2)^* \geq 1,8$ (178.2)*

. Y Si $(175.2)^* < 3,6$ o $(176.2)^* < 3,6$:

Reducir el nivel de recuperación $R_{OI-8} = R_{OI-1}$, y recalculer el sistema desde el apartado 5º, entrando con el nuevo valor R_{OI-1} en (113)*, y así sucesivamente hasta lograr que $(175.2)^* \geq 3,6$ y $(176.2)^* \geq 3,6$.

9º) Cálculo de la presión osmótica del agua de alimentación.

- A partir de las concentraciones molales de todos los constituyentes (iónicos y no iónicos) del agua de alimentación:

. $(m_{Ca})_a = (70)^*$

. $(m_{Mg})_a = (71)^*$

. $(m_{Na})_a = (72)^*$

. $(m_K)_a = (73)^*$

. $(m_{Ba})_a = (74)^*$

. $(m_{Sr})_a = (75)^*$

- . $(m_{\text{HCO}_3})_a = (76)^*$
- . $(m_{\text{SO}_4})_a = (77)^*$
- . $(m_{\text{NO}_3})_a = (78)^*$
- . $(m_{\text{Cl}})_a = (79)^*$
- . $(m_{\text{F}})_a = (80)^*$
- . $(m_{\text{SiO}_2}) = (12)^* / (60090(((10)^6 - \text{STD}_a)/(10)^6)) \quad (179)^*$

Despreciando la influencia de la posible presencia, siempre en pequeñas cantidades, de hierro, manganeso o aluminio.

- *Calcular la presión osmótica del agua de alimentación. Indicándola en atm. A partir de: $\pi_a = 0,076(T+273,15) \Sigma m_i$ (atm). Siendo:*

$$\cdot \Sigma m_i = (70)^* + \dots + (80)^* + (179)^* \quad (180)^*$$

$$\cdot \pi_a (T_{\text{mín}}) = 0,076((17)^* + 273,15) \times (180)^* \quad (181)^*$$

$$\cdot \pi_a (T_{\text{med}}) = 0,076((18)^* + 273,15) \times (180)^* \quad (182)^*$$

$$\cdot \pi_a (T_{\text{máx}}) = 0,076((19)^* + 273,15) \times (180)^* \quad (183)^*$$

- *Indicar la presión osmótica del agua de alimentación en kg/cm²:*

$$\cdot \pi_a (T_{\text{mín}}) = (181)^* \times 1,033 \quad (184)^*$$

$$\cdot \pi_a (T_{\text{med}}) = (182)^* \times 1,033 \quad (185)^*$$

$$\cdot \pi_a (T_{\text{máx}}) = (183)^* \times 1,033 \quad (186)^*$$

- *Indicar la presión osmótica del agua de alimentación en psi:*

$$\cdot \pi_a (T_{\text{mín}}) = (184)^* / 0,0703 \quad (187)^*$$

$$\cdot \pi_a (T_{\text{med}}) = (185)^* / 0,0703 \quad (188)^*$$

$$\cdot \pi_a (T_{\text{máx}}) = (186)^* / 0,0703 \quad (189)^*$$

10º) Considerar el factor de temperatura.

- A partir de:

$$\cdot FT = e^{3480((1/298) - (1/(273+T)))}. \text{ Para } T \leq 25^\circ\text{C}.$$

. $FT = e^{2640((1/298)-(1/(273+T)))}$. Para $T > 25^{\circ}\text{C}$.

- Calcular el valor del factor para la temperatura mínima ($T_{\text{mín}}$):

. Para $(17)^* \leq 25^{\circ}\text{C}$. $FT = e^{3480((1/298)-(1/(273+(17)^*)))}$. (190)*

. Para $(17)^* > 25^{\circ}\text{C}$. $FT = e^{2640((1/298)-(1/(273+(17)^*)))}$. (191)*

- Calcular el valor del factor para la temperatura media (T_{med}):

. Para $(18)^* \leq 25^{\circ}\text{C}$. $FT = e^{3480((1/298)-(1/(273+(18)^*)))}$. (192)*

. Para $(18)^* > 25^{\circ}\text{C}$. $FT = e^{2640((1/298)-(1/(273+(18)^*)))}$. (193)*

- Calcular el valor del factor para la temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$):

. Para $(19)^* \leq 25^{\circ}\text{C}$. $FT = e^{3480((1/298)-(1/(273+(19)^*)))}$. (194)*

. Para $(19)^* > 25^{\circ}\text{C}$. $FT = e^{2640((1/298)-(1/(273+(19)^*)))}$. (195)*

11º) Considerar el factor de tiempo de operación.

. Para $t = 0$ años: $F_t = F_0 = 1$ (196)*

. Para $t = 1$ año: $F_t = F_1 = 0,9$ (197)*

. Para $t = 3$ años: $F_t = F_3 = 0,8$ (198)*

. Para $t = 5$ años: $F_t = F_5 = 0,7$ (199)*

12º) Cálculo de la recuperación media por elemento de OI (\bar{R}_i).

- Por aplicación de:

$$\bar{R}_i = 1 - [1 - (R_{OI}/100)]^{1/n}$$

. Para sistemas de OI de 1 etapa ($R_{OI} \leq 53$):

. $n = N_{Em}$

. $\bar{R}_i = 1 - [1 - ((113)^*/100)]^{1/(N_{Em})}$ (200)*

. Para sistemas de OI de 2 etapas ($53 < R_{OI} \leq 87$):

. $n = 2N_{Em}$

. $\bar{R}_i = 1 - [1 - ((441)^*/100)]^{1/(2N_{Em})}$ (201)*

13º) Cálculo de la polarización de la concentración media por elemento de OI (\bar{PC}).

- Por aplicación de:

$$\bar{PC} = e^{0,7 \bar{R}_i}$$

. Calcular:

. $\bar{PC} = e^{0,7((200)^*o(201)^*)}$ (202)*

14º) Cálculo del factor de recuperación del sistema de OI (FR).

- Por aplicación de:

$$FR = [\ln(100/(100-R_{OI}))] / (R_{OI}/100).$$

. Calcular:

. $FR = [\ln(100/(100-(113)^*))] / ((113)^*/100)$ (203)*

15º) Cálculo de la presión osmótica de la concentración media alimentación-rechazo del sistema de OI (π_{ar}).

- Por aplicación de:

$$\pi_{ar} = \pi_a \times FR \times \bar{PC}$$

- Calcular la presión osmótica de la concentración media alimentación-rechazo del sistema de OI (π_{ar}) en atm:

. $\pi_{ar}(T_{min}) = (181)^* \times (203)^* \times (202)^*$ (204)*

$$\cdot \pi_{ar} (T_{med}) = (182)^* \times (203)^* \times (202)^* \quad (205)^*$$

$$\cdot \pi_{ar} (T_{m\acute{a}x}) = (183)^* \times (203)^* \times (202)^* \quad (206)^*$$

- *Indicar la presión osmótica de la concentración media alimentación-rechazo del sistema de OI (π_{ar}) en kg/cm²:*

$$\cdot \pi_{ar} (T_{m\acute{i}n}) = (184)^* \times (203)^* \times (202)^* \quad (207)^*$$

$$\cdot \pi_{ar} (T_{med}) = (185)^* \times (203)^* \times (202)^* \quad (208)^*$$

$$\cdot \pi_{ar} (T_{m\acute{a}x}) = (186)^* \times (203)^* \times (202)^* \quad (209)^*$$

- *Indicar la presión osmótica de la concentración media alimentación-rechazo del sistema de OI (π_{ar}) en psi:*

$$\cdot \pi_{ar} (T_{m\acute{i}n}) = (187)^* \times (203)^* \times (202)^* \quad (210)^*$$

$$\cdot \pi_{ar} (T_{med}) = (188)^* \times (203)^* \times (202)^* \quad (211)^*$$

$$\cdot \pi_{ar} (T_{m\acute{a}x}) = (189)^* \times (203)^* \times (202)^* \quad (212)^*$$

16º) Cálculo del coeficiente de permeabilidad al agua medio del sistema de OI
($\bar{K} a_m (T)$) en galones / (ft².día.psi).

- Por aplicación de:

$$\cdot \bar{K} a_m (T) = 0,125\text{FT. Para } \pi_{ar} \leq 25 \text{ psi.}$$

$$\cdot \bar{K} a_m (T) = 0,125\text{FT} - [0,011(\pi_{ar} - 25)/35]\text{FT. Para } 25 < \pi_{ar} \leq 200 \text{ psi.}$$

$$\cdot \bar{K} a_m (T) = 0,125\text{FT} - [0,0001(\pi_{ar} - 200)]\text{FT. Para } 200 < \pi_{ar} \leq 400 \text{ psi.}$$

- *Para $T = T_{m\acute{i}n}$.*

. Si $(210)^* \leq 25$ psi.

$$\bar{K} a_m (T_{\min}) = 0,125 \times ((190)^*o(191)^*) \quad (213)^*$$

. Si $25 < (210)^* \leq 200$ psi.

$$\bar{K} a_m (T_{\min}) = (213)^* - [0,011((210)^* - 25)/35] \times ((190)^*o(191)^*) \quad (214)^*$$

. Si $200\text{psi} < (210)^*$.

$$\bar{K} a_m (T_{\min}) = (213)^* - [0,0001((210)^* - 200)] \times ((190)^*o(191)^*) \quad (215)^*$$

- Para $T = T_{\text{med}}$.

. Si $(211)^* \leq 25$ psi.

$$\bar{K} a_m (T_{\text{med}}) = 0,125 \times ((192)^*o(193)^*) \quad (216)^*$$

. Si $25 < (211)^* \leq 200$ psi.

$$\bar{K} a_m (T_{\text{med}}) = (216)^* - [0,011((211)^* - 25)/35] \times ((192)^*o(193)^*) \quad (217)^*$$

. Si $200\text{psi} < (211)^*$.

$$\bar{K} a_m (T_{\text{med}}) = (216)^* - [0,0001((211)^* - 200)] \times ((192)^*o(193)^*) \quad (218)^*$$

- Para $T = T_{\text{máx}}$.

. Si $(212)^* \leq 25$ psi.

$$\bar{K} a_m (T_{\text{máx}}) = 0,125 \times ((194)^*o(195)^*) \quad (219)^*$$

. Si $25 < (212)^* \leq 200$ psi.

$$\bar{K} a_m (T_{\text{máx}}) = (219)^* - [0,011((212)^* - 25)/35] \times ((194)^*o(195)^*) \quad (220)^*$$

. Si $200\text{psi} < (212)^*$.

$$\bar{K} a_m (T_{\text{máx}}) = (219)^* - [0,0001((212)^* - 200)] \times ((194)^*o(195)^*) \quad (221)^*$$

17º) Indicar el coeficiente de permeabilidad al agua medio del sistema de OI ($\bar{K} a_m$ (T)) en $m^3 / (m^2 \cdot dia \cdot kg/cm^2)$.

- Para $T = T_{mín}$.

. Si $(210)^* \leq 25$ psi.

$$\bar{K} a_m (T_{mín}) = (213)^* \times (3,785/1000) / (0,0929 \times 0,0703) \quad (222)^*$$

. Si $25 < (210)^* \leq 200$ psi.

$$\bar{K} a_m (T_{mín}) = (214)^* \times (3,785/1000) / (0,0929 \times 0,0703) \quad (223)^*$$

. Si $200 \text{psi} < (210)^*$.

$$\bar{K} a_m (T_{mín}) = (215)^* \times (3,785/1000) / (0,0929 \times 0,0703) \quad (224)^*$$

- Para $T = T_{med}$.

. Si $(211)^* \leq 25$ psi.

$$\bar{K} a_m (T_{med}) = (216)^* \times (3,785/1000) / (0,0929 \times 0,0703) \quad (225)^*$$

. Si $25 < (211)^* \leq 200$ psi.

$$\bar{K} a_m (T_{med}) = (217)^* \times (3,785/1000) / (0,0929 \times 0,0703) \quad (226)^*$$

. Si $200 \text{psi} < (211)^*$.

$$\bar{K} a_m (T_{med}) = (218)^* \times (3,785/1000) / (0,0929 \times 0,0703) \quad (227)^*$$

- Para $T = T_{máx}$.

. Si $(212)^* \leq 25$ psi.

$$\bar{K} a_m (T_{máx}) = (219)^* \times (3,785/1000) / (0,0929 \times 0,0703) \quad (228)^*$$

. Si $25 < (212)^* \leq 200$ psi.

$$\cdot \bar{K} a_m (T_{\text{máx}}) = (220)^* \times (3,785/1000) / (0,0929 \times 0,0703) \quad (229)^*$$

. Si $200 \text{psi} < (212)^*$.

$$\cdot \bar{K} a_m (T_{\text{máx}}) = (221)^* \times (3,785/1000) / (0,0929 \times 0,0703) \quad (230)^*$$

18º) Cálculo de la caída de presión alimentación – rechazo, del sistema de OI
($\Delta \bar{P}_{\text{ar}}$) en kg/cm^2 .

- Si $(113)^* \leq 53$ (1 etapa).

. Calcular el flujo medio alimentación – rechazo por módulo del sistema de OI en galones por minuto (\bar{F}_{ar}).

$$\cdot \bar{F}_{\text{ar}} = 4,4 \times [(Q_a + Q_r) / 2N_m].$$

. Para los elementos de 4"X40":

$$\cdot \bar{F}_{\text{ar}} = 4,4 \times [((164)^* + (165)^*) / 2(144.1)^*] \quad (231)^*$$

. Para los elementos de 8"X40":

$$\cdot \bar{F}_{\text{ar}} = 4,4 \times [((164)^* + (165)^*) / 2(144.2)^*] \quad (232)^*$$

. Para los elementos de 4"X40":

$$\cdot \Delta \bar{P}_{\text{ar}} = 0,00703 \times N_{\text{Em}} \times [\bar{F}_{\text{ar}}]^{1,7}.$$

$$\cdot \Delta \bar{P}_{\text{ar}} = 0,00703 \times ((114)^* \text{ o } \dots (119)^*) \times [(231)^*]^{1,7} \quad (233)^*$$

. Para los elementos de 8"X40":

$$\cdot \Delta \bar{P}_{\text{ar}} = 0,000703 \times N_{\text{Em}} \times [\bar{F}_{\text{ar}}]^{1,7}.$$

$$\cdot \Delta \bar{P}_{\text{ar}} = 0,000703 \times ((114)^* \text{ o } \dots (119)^*) \times [(232)^*]^{1,7} \quad (234)^*$$

- Si $53 < (113)^* \leq 87$ (2 etapas).

. Calcular $(4,4Q_p/2R_{OI})^{1,7}$:
 . $[4,4x(21)/(2x(113)^*)]^{1,7}$ (235)*

. Calcular $[(100+8N_{Em})/N_{m-1e-4}]^{1,7}$, para sistemas con elementos de 4":
 . Siendo $N_{m-1e-4} = (147.1)^*o(151.1)^*o(155.1)^*o(159.1)^*$ (236)*

. $[(100+8x(120)^*) / (236)^*]^{1,7}$ (237)*

. Calcular $[(100+8N_{Em})/N_{m-1e-8}]^{1,7}$, para sistemas con elementos de 8":
 . Siendo $N_{m-1e-8} = (147.2)^*o(151.2)^*o(155.2)^*o(159.2)^*$ (238)*

. $[(100+8x(120)^*) / (238)^*]^{1,7}$ (239)*

. Calcular $[(13N_{Em})/N_{m-2e-4}]^{1,7}$, para sistemas con elementos de 4":
 . Siendo $N_{m-2e-4} = (148.1)^*o(152.1)^*o(156.1)^*o(160.1)^*$ (240)*

. $[(13x(120)^*) / (240)^*]^{1,7}$ (241)*

. Calcular $[(13N_{Em})/N_{m-2e8}]^{1,7}$, para sistemas con elementos de 8":
 . Siendo $N_{m-2e-8} = (148.2)^*o(152.2)^*o(156.2)^*o(160.2)^*$ (242)*

. $[(13x(120)^*) / (242)^*]^{1,7}$ (243)*

. Para sistemas de OI con elementos de 4"X40":
 . $\Delta \bar{P}_{ar} = 0,00703x(120)^*x(235)^*[(237)^*+(241)^*]$ (244)*

. Para sistemas de OI con elementos de 8"X40":
 . $\Delta \bar{P}_{ar} = 0,000703x(120)^*x(235)^*[(239)^*+(243)^*]$ (245)*

19º) Cálculo de la presión de alimentación del sistema de OI (P_a) en kg/cm².

- Condiciones de diseño del equipo de bombeo (máxima presión) para los elementos de OI contemplados hasta ahora (de 4"X40", el BW30-4040, cuya S_E es 6,5 m², y de 8"X40", el BW30-330, cuya S_E es de 31 m²):

. $T = T_{\text{mín.}}$

. $t = 5 \text{ años.}$

. Para sistemas de OI con elementos de 4"X40". Calcular:

. $N_{E-4} \times S_{E-4} \times Ft \times \bar{K} a_m (T_{\text{mín.}}).$

. $(163.1) \times (126.1) \times (199) \times ((222) \circ (223) \circ (224)^*)$ (246)*

. Para sistemas de OI con elementos de 8"X40". Calcular:

. $N_{E-8} \times S_{E-8} \times Ft \times \bar{K} a_m (T_{\text{mín.}}).$

. $(163.2) \times (126.2) \times (199) \times ((222) \circ (223) \circ (224)^*)$ (247)*

. Calcular:

. $FR \times \bar{PC}.$

. $(203) \times (202)^*$ (248)*

. Para sistemas de OI con elementos de 4"X40". Calcular:

. $\Delta \bar{P}_{ar} / 2.$

. $[(233) \circ (244)^*] / 2$ (249)*

. Para sistemas de OI con elementos de 8"X40". Calcular:

. $\Delta \bar{P}_{ar} / 2.$

. $[(234) \circ (245)^*] / 2$ (250)*

. Para sistemas de OI con elementos de 4"X40". Calcular:

. $P_{a-\text{máx}} = [(22) \circ (246)^*] + (184) \circ [(248)^* - 0,01] + (249)^* + 0,35$ (251)*

. Para sistemas de OI con elementos de 8"X40". Calcular:

. $P_{a-\text{máx}} = [(22) \circ (247)^*] + (184) \circ [(248)^* - 0,01] + (250)^* + 0,35$ (252)*

- Condiciones de diseño del equipo de bombeo (máxima presión) para los elementos de OI no contemplados hasta ahora (de 4"X40", el BWLP-4040, cuya S_E es 7,25 m², y de 8"X40", el BW30-365, cuya S_E es de 34 m², el BW30-400, cuya S_E es de 37 m², y el BW30-440, cuya S_E es de 41 m²):

. $T = T_{\text{mín.}}$

. $t = 5$ años.

. $S_{E-4} = 7,25$ (253)*

. $S_{E-8} = 34$ (254)*

. $S_{E-8} = 37$ (255)*

. $S_{E-8} = 41$ (256)*

. Para sistemas de OI con elementos de 4"X40". Calcular:

. $N_{E-4} \times S_{E-4} \times Ft \times \bar{K} a_m (T_{\text{mín.}})$

. $(163.1)^* \times (253)^* \times (199)^* \times ((222)^* \circ (223)^* \circ (224)^*)$ (257)*

. Para sistemas de OI con elementos de 8"X40". Calcular:

. $N_{E-8} \times S_{E-8} \times Ft \times \bar{K} a_m (T_{\text{mín.}})$

. $(163.2)^* \times ((254)^* \circ (255)^* \circ (256)^*) \times (199)^* \times ((222)^* \circ (223)^* \circ (224)^*)$ (258)*

. Para sistemas de OI con elementos de 4"X40". Calcular:

. $P_{a-\text{máx}} = [(22)^* / (257)^*] + (184)^* [(248)^* - 0,01] + (249)^* + 0,35$ (259)*

. Para sistemas de OI con elementos de 8"X40". Calcular:

. $P_{a-\text{máx}} = [(22)^* / (258)^*] + (184)^* [(248)^* - 0,01] + (250)^* + 0,35$ (260)*

- Condiciones de diseño estándar para todos los elementos de OI:

. $T = T_{\text{med.}}$

. $t = 3$ años.

. Para sistemas de OI con elementos de 4"X40". Calcular:

$$. N_{E-4} \times S_{E-4} \times Ft \times \bar{K} a_m (T_{\min}).$$

. Para los que corresponden a $S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$.

$$. (163.1) \times (126.1) \times (198) \times ((225) \circ (226) \circ (227) *) \quad (261) *$$

. Para los que corresponden a $S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$.

$$. (163.1) \times (253) \times (198) \times ((225) \circ (226) \circ (227) *) \quad (262) *$$

. Para sistemas de OI con elementos de 8"X40". Calcular:

$$. N_{E-8} \times S_{E-8} \times Ft \times \bar{K} a_m (T_{\min}).$$

. Para los que corresponden a $S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$.

$$(163.2) \times (126.2) \times (198) \times ((225) \circ (226) \circ (227) *) \quad (263) *$$

. Para los que corresponden a $S_{E-8} = 34 \text{ o } 37 \text{ o } 41 \text{ m}^2$.

$$(163.2) \times ((254) \circ (255) \circ (256) *) \times (198) \times ((225) \circ (226) \circ (227) *) \quad (264) *$$

. Para sistemas de OI con elementos de 4"X40". Calcular:

$$. P_{a-es} = [(22) \circ ((261) \circ (262) *)] + (185) \circ [(248) \circ -0,01] + (249) \circ +0,35 \quad (265) *$$

. Para sistemas de OI con elementos de 8"X40". Calcular:

$$. P_{a-es} = [(22) \circ ((263) \circ (264) *)] + (185) \circ [(248) \circ -0,01] + (250) \circ +0,35 \quad (266) *$$

20º) Cálculo de la calidad esperada del agua producto del sistema de OI.

- Calcular para cada componente iónico y no iónico j presente en el agua de alimentación, el valor de la expresión:

$$. (Cj)_a \times FR \times \bar{PC} :$$

- Cationes:

. Ca: (1)*x(248)*	(267)*
. Mg: (2)*x(248)*	(268)*
. Na: (40)*x(248)*	(269)*
. K: (4)*x(248)*	(270)*
. Ba: (5)*x(248)*	(271)*
. Sr: (6)*x(248)*	(272)*
- Aniones:	
. HCO ₃ : (7)*x(248)*	(273)*
. SO ₄ : (8)*x(248)*	(274)*
. NO ₃ : (9)*x(248)*	(275)*
. Cl: (39)*x(248)*	(276)*
. F: (11)*x(248)*	(277)*
- Otros:	
. SiO ₂ : (12)*x(248)*	(278)*
- <u>Condiciones de diseño estándar para todos los elementos de OI:</u>	
. $T = T_{med}$.	
. Calcular para cada componente iónico y no iónico j presente en el agua de alimentación, el valor de la expresión:	
. $N_E \times S_E \times \bar{K} j_m (T_{med})$:	
. Para sistemas de OI con elementos de 4"X40". Calcular:	
. $N_{E-4} \times S_{E-4} \times \bar{K} j_m (T_{med})$.	
. Para los que corresponden a $S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$.	
- Cationes:	
. Ca: (163.1)*x(126.1)*x0,00303	(279)*
. Mg: (163.1)*x(126.1)*x0,00242	(280)*
. Na: (163.1)*x(126.1)*x0,01117	(281)*

- . K: $(163.1) \times (126.1) \times 0,01600$ (282)*
- . Ba: $(163.1) \times (126.1) \times 0,00300$ (***) (283)*
- . Sr: $(163.1) \times (126.1) \times 0,00300$ (***) (284)*
- Aniones:
 - . HCO₃: $(163.1) \times (126.1) \times 0,00601$ (285)*
 - . SO₄: $(163.1) \times (126.1) \times 0,00030$ (286)*
 - . NO₃: $(163.1) \times (126.1) \times 0,04707$ (287)*
 - . Cl: $(163.1) \times (126.1) \times 0,00809$ (288)*
 - . F: $(163.1) \times (126.1) \times 0,01$ (***) (289)*
- Otros:
 - . SiO₂: $(163.1) \times (126.1) \times 0,00255$ (290)*
- . Para los que corresponden a $S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$.
- Cationes:
 - . Ca: $(163.1) \times (253) \times 0,00303$ (291)*
 - . Mg: $(163.1) \times (253) \times 0,00242$ (292)*
 - . Na: $(163.1) \times (253) \times 0,01117$ (293)*
 - . K: $(163.1) \times (253) \times 0,01600$ (294)*
 - . Ba: $(163.1) \times (253) \times 0,00300$ (***) (295)*
 - . Sr: $(163.1) \times (253) \times 0,00300$ (***) (296)*
- Aniones:
 - . HCO₃: $(163.1) \times (253) \times 0,00601$ (297)*
 - . SO₄: $(163.1) \times (253) \times 0,00030$ (298)*
 - . NO₃: $(163.1) \times (253) \times 0,04707$ (299)*
 - . Cl: $(163.1) \times (253) \times 0,00809$ (300)*
 - . F: $(163.1) \times (253) \times 0,01$ (***) (301)*
- Otros:
 - . SiO₂: $(163.1) \times (253) \times 0,00255$ (302)*
- . Para sistemas de OI con elementos de 8"X40". Calcular:
 - . $N_{E-8} \times S_{E-8} \times Ft \times \bar{K} j_m (T_{med})$.

. Para los que corresponden a $S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$.

- Cationes:

. Ca: $(163.2) \times (126.2) \times 0,00303$ (303)*

. Mg: $(163.2) \times (126.2) \times 0,00242$ (304)*

. Na: $(163.2) \times (126.2) \times 0,01117$ (305)*

. K: $(163.2) \times (126.2) \times 0,01600$ (306)*

. Ba: $(163.2) \times (126.2) \times 0,00300$ (***) (307)*

. Sr: $(163.2) \times (126.2) \times 0,00300$ (***) (308)*

- Aniones:

. HCO_3 : $(163.2) \times (126.2) \times 0,00601$ (309)*

. SO_4 : $(163.2) \times (126.2) \times 0,00030$ (310)*

. NO_3 : $(163.2) \times (126.2) \times 0,04707$ (311)*

. Cl: $(163.2) \times (126.2) \times 0,00809$ (312)*

. F: $(163.2) \times (126.2) \times 0,01$ (***) (313)*

- Otros:

. SiO_2 : $(163.2) \times (126.2) \times 0,00255$ (314)*

. Para los que corresponden a $S_{E-8} = 34$ o 37 o 41 m^2 .

- Cationes:

. Ca: $(163.2) \times ((254) \circ (255) \circ (256)^*) \times 0,00303$ (315)*

. Mg: $(163.2) \times ((254) \circ (255) \circ (256)^*) \times 0,00242$ (316)*

. Na: $(163.2) \times ((254) \circ (255) \circ (256)^*) \times 0,01117$ (317)*

. K: $(163.2) \times ((254) \circ (255) \circ (256)^*) \times 0,01600$ (318)*

. Ba: $(163.2) \times ((254) \circ (255) \circ (256)^*) \times 0,00300$ (***) (319)*

. Sr: $(163.2) \times ((254) \circ (255) \circ (256)^*) \times 0,00300$ (***) (320)*

- Aniones:

. HCO_3 : $(163.2) \times ((254) \circ (255) \circ (256)^*) \times 0,00601$ (321)*

. SO_4 : $(163.2) \times ((254) \circ (255) \circ (256)^*) \times 0,00030$ (322)*

. NO_3 : $(163.2) \times ((254) \circ (255) \circ (256)^*) \times 0,04707$ (323)*

. Cl: $(163.2) \times ((254) \circ (255) \circ (256)^*) \times 0,00809$ (324)*

. F: $(163.2) \times ((254) \circ (255) \circ (256)^*) \times 0,01$ (***) (325)*

- Otros:
 - . $\text{SiO}_2: (163.2)^* \times ((254)^* \circ (255)^* \circ (256)^*) \times 0,00255$ (326)*

Nota (***): Para los iones Ba, Sr y F, al no disponer de datos prácticos obtenidos en la planta objeto de este trabajo sobre los valores de $\bar{K} j_m$, se han adoptado los propuestos por el fabricante, en este caso Filmtec.

- Calcular para cada componente iónico y no iónico j presente en el agua producto, el valor de la expresión:

$$. (Cj)_p = N_E \times S_E \times \bar{K} j_m (T_{med}) \times (Cj)_a \times FR \times \bar{PC} / Q:$$

. Para sistemas de OI con elementos de 4"X40". Calcular:

$$. (Cj)_p = N_{E-4} \times S_{E-4} \times \bar{K} j_m (T_{med}) \times (Cj)_a \times FR \times \bar{PC} / Q:$$

. Para los que corresponden a $S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$.

- Cationes en mg/l:
 - . $(Ca)_p = (279)^* \times (267)^* / (22)^*$ (327)*
 - . $(Mg)_p = (280)^* \times (268)^* / (22)^*$ (328)*
 - . $(Na)_p = (281)^* \times (269)^* / (22)^*$ (329)*
 - . $(K)_p = (282)^* \times (270)^* / (22)^*$ (330)*
 - . $(Ba)_p = (283)^* \times (271)^* / (22)^*$ (331)*
 - . $(Sr)_p = (284)^* \times (272)^* / (22)^*$ (332)*
- Aniones en mg/l:
 - . $(HCO_3)_p = (285)^* \times (273)^* / (22)^*$ (333)*
 - . $(SO_4)_p = (286)^* \times (274)^* / (22)^*$ (334)*
 - . $(NO_3)_p = (287)^* \times (275)^* / (22)^*$ (335)*
 - . $(Cl)_p = (288)^* \times (276)^* / (22)^*$ (336)*
 - . $(F)_p = (289)^* \times (277)^* / (22)^*$ (337)*
- Otros en mg/l:
 - . $(SiO_2)_p = (290)^* \times (278)^* / (22)^*$ (338)*
 - . $(STD)_{p-es} = (327)^* + (328)^* + (329)^* + (330)^* + (331)^* + (332)^* + (333)^* +$

$$(334)^* + (335)^* + (336)^* + (337) + (338)^* \quad (339)^*$$

. Para los que corresponden a $S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$.

- Cationes en mg/l:

$$. (\text{Ca})_p = (291)^* \times (267)^* / (22)^* \quad (340)^*$$

$$. (\text{Mg})_p = (292)^* \times (268)^* / (22)^* \quad (341)^*$$

$$. (\text{Na})_p = (293)^* \times (269)^* / (22)^* \quad (342)^*$$

$$. (\text{K})_p = (294)^* \times (270)^* / (22)^* \quad (343)^*$$

$$. (\text{Ba})_p = (295)^* \times (271)^* / (22)^* \quad (344)^*$$

$$. (\text{Sr})_p = (296)^* \times (272)^* / (22)^* \quad (345)^*$$

- Aniones en mg/l:

$$. (\text{HCO}_3)_p = (297)^* \times (273)^* / (22)^* \quad (346)^*$$

$$. (\text{SO}_4)_p = (298)^* \times (274)^* / (22)^* \quad (347)^*$$

$$. (\text{NO}_3)_p = (299)^* \times (275)^* / (22)^* \quad (348)^*$$

$$. (\text{Cl})_p = (300)^* \times (276)^* / (22)^* \quad (349)^*$$

$$. (\text{F})_p = (301)^* \times (277)^* / (22)^* \quad (350)^*$$

- Otros en mg/l:

$$. (\text{SiO}_2)_p = (302)^* \times (278)^* / (22)^* \quad (351)^*$$

$$. (\text{STD})_{p\text{-es}} = (340)^* + (341)^* + (342)^* + (343)^* + (344)^* + (345)^* + (346)^* + (347)^* + (348)^* + (349)^* + (350) + (351)^* \quad (352)^*$$

. Para sistemas de OI con elementos de 8"X40". Calcular:

$$. (\text{Cj})_p = N_{E-8} \times S_{E-8} \times \bar{K} j_m (T_{\text{med}}) \times (\text{Cj})_a \times \text{FR} \times \overline{PC} / Q:$$

. Para los que corresponden a $S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$.

- Cationes en mg/l:

$$. (\text{Ca})_p = (303)^* \times (267)^* / (22)^* \quad (353)^*$$

$$. (\text{Mg})_p = (304)^* \times (268)^* / (22)^* \quad (354)^*$$

$$. (\text{Na})_p = (305)^* \times (269)^* / (22)^* \quad (355)^*$$

$$. (\text{K})_p = (306)^* \times (270)^* / (22)^* \quad (356)^*$$

$$. (\text{Ba})_p = (307)^* \times (271)^* / (22)^* \quad (357)^*$$

- . $(Sr)_p = (308)^* \times (272)^* / (22)^*$ (358)*
- Aniones en mg/l:
 - . $(HCO_3)_p = (309)^* \times (273)^* / (22)^*$ (359)*
 - . $(SO_4)_p = (310)^* \times (274)^* / (22)^*$ (360)*
 - . $(NO_3)_p = (311)^* \times (275)^* / (22)^*$ (361)*
 - . $(Cl)_p = (312)^* \times (276)^* / (22)^*$ (362)*
 - . $(F)_p = (313)^* \times (277)^* / (22)^*$ (363)*
- Otros en mg/l:
 - . $(SiO_2)_p = (314)^* \times (278)^* / (22)^*$ (364)*
 - . $(STD)_{p-es} = (353)^* + (354)^* + (355)^* + (356)^* + (357)^* + (358)^* + (359)^* + (360)^* + (361)^* + (362)^* + (363) + (364)^*$ (365)*
- . Para los que corresponden a $S_{E-8} = 34$ o 37 o 41 m².
- Cationes en mg/l:
 - . $(Ca)_p = (315)^* \times (267)^* / (22)^*$ (366)*
 - . $(Mg)_p = (316)^* \times (268)^* / (22)^*$ (367)*
 - . $(Na)_p = (317)^* \times (269)^* / (22)^*$ (368)*
 - . $(K)_p = (318)^* \times (270)^* / (22)^*$ (369)*
 - . $(Ba)_p = (319)^* \times (271)^* / (22)^*$ (370)*
 - . $(Sr)_p = (320)^* \times (272)^* / (22)^*$ (371)*
- Aniones en mg/l:
 - . $(HCO_3)_p = (321)^* \times (273)^* / (22)^*$ (372)*
 - . $(SO_4)_p = (322)^* \times (274)^* / (22)^*$ (373)*
 - . $(NO_3)_p = (323)^* \times (275)^* / (22)^*$ (374)*
 - . $(Cl)_p = (324)^* \times (276)^* / (22)^*$ (375)*
 - . $(F)_p = (325)^* \times (277)^* / (22)^*$ (376)*
- Otros en mg/l:
 - . $(SiO_2)_p = (326)^* \times (278)^* / (22)^*$ (377)*
 - . $(STD)_{p-es} = (366)^* + (367)^* + (368)^* + (369)^* + (370)^* + (371)^* + (372)^* + (373)^* + (374)^* + (375)^* + (376) + (377)^*$ (378)*

- Estimar el valor del pH del agua producto en las condiciones estándar de diseño (pH_{p-est}), a partir de:

$$pH_{p-est} = 6,3 + \log([HCO_3]_p / (CO_2)_p).$$

. Para los de 4", que corresponden a $S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$. Calcular:

$$. [HCO_3]_p = (333)^* \times 0,819 \quad (379)^*$$

$$. pH_{p-est} = 6,3 + \log((379)^* / (49)^*) \quad (380)^*$$

. Para los de 4", que corresponden a $S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$. Calcular:

$$. [HCO_3]_p = (346)^* \times 0,819 \quad (381)^*$$

$$. pH_{p-est} = 6,3 + \log((381)^* / (49)^*) \quad (382)^*$$

. Para los de 8", que corresponden a $S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$. Calcular:

$$. [HCO_3]_p = (359)^* \times 0,819 \quad (383)^*$$

$$. pH_{p-est} = 6,3 + \log((383)^* / (49)^*) \quad (384)^*$$

. Para los de 8", que corresponden a $S_{E-8} = 34$ o 37 o 41 m^2 . Calcular:

$$. [HCO_3]_p = (372)^* \times 0,819 \quad (385)^*$$

$$. pH_{p-est} = 6,3 + \log((385)^* / (49)^*) \quad (386)^*$$

- Condiciones de diseño desfavorables (peor calidad del agua producto):

$$. T = T_{m\acute{a}x}.$$

. Sustituyendo el valor de $\bar{K} j_m (T_{med})$, por el de $\bar{K} j_m (T_{m\acute{a}x})$:

$$. \bar{K} j_m (T_{m\acute{a}x}) = \bar{K} j_m (T_{med}) \times FT(T_{m\acute{a}x}) / FT(T_{med}).$$

. Para sistemas de OI con elementos de 4"X40". Calcular:

$$. (Cj)_p = N_{E-4} \times S_{E-4} \times \bar{K} j_m (T_{m\acute{a}x}) \times (Cj)_a \times FR \times \overline{PC} / Q:$$

. Para los que corresponden a $S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$.

- Cationes en mg/l:

$$\cdot (Ca)_p = (327)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (387)^*$$

$$\cdot (Mg)_p = (328)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (388)^*$$

$$\cdot (Na)_p = (329)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (389)^*$$

$$\cdot (K)_p = (330)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (390)^*$$

$$\cdot (Ba)_p = (331)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (391)^*$$

$$\cdot (Sr)_p = (332)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (392)^*$$

- Aniones en mg/l:

$$\cdot (HCO_3)_p = (333)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (393)^*$$

$$\cdot (SO_4)_p = (334)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (394)^*$$

$$\cdot (NO_3)_p = (335)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (395)^*$$

$$\cdot (Cl)_p = (336)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (396)^*$$

$$\cdot (F)_p = (337)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (397)^*$$

- Otros en mg/l:

$$\cdot (SiO_2)_p = (338)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (398)^*$$

$$\cdot (STD)_{p-de} = (387)^* + (388)^* + (389)^* + (390)^* + (391)^* + (392)^* + (393)^* + (394)^* + (395)^* + (396)^* + (397)^* + (398)^* \quad (399)^*$$

Para los que corresponden a $S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$.

- Cationes en mg/l:

$$\cdot (Ca)_p = (340)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (400)^*$$

$$\cdot (Mg)_p = (341)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (401)^*$$

$$\cdot (Na)_p = (342)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (402)^*$$

$$\cdot (K)_p = (343)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (403)^*$$

$$\cdot (Ba)_p = (344)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (404)^*$$

$$\cdot (Sr)_p = (345)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (405)^*$$

- Aniones en mg/l:

$$\cdot (HCO_3)_p = (346)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (406)^*$$

$$\cdot (SO_4)_p = (347)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (407)^*$$

$$\cdot (NO_3)_p = (348)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (408)^*$$

$$\cdot (Cl)_p = (349)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (409)^*$$

$$\cdot (F)_p = (350)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (410)^*$$

- Otros en mg/l:

$$\cdot (SiO_2)_p = (351)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (411)^*$$

$$\cdot (STD)_{p-de} = (400)^* + (401)^* + (402)^* + (403)^* + (404)^* + (405)^* + (406)^* + (407)^* + (408)^* + (409)^* + (410) + (411)^* \quad (412)^*$$

. Para sistemas de OI con elementos de 8"X40". Calcular:

$$\cdot (Cj)_p = N_{E-8} \times S_{E-8} \times \bar{K} j_m (T_{m\acute{a}x}) \times (Cj)_a \times FR \times \bar{PC} / Q:$$

. Para los que corresponden a $S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$.

- Cationes en mg/l:

$$\cdot (Ca)_p = (353)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (413)^*$$

$$\cdot (Mg)_p = (354)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (414)^*$$

$$\cdot (Na)_p = (355)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (415)^*$$

$$\cdot (K)_p = (356)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (416)^*$$

$$\cdot (Ba)_p = (357)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (417)^*$$

$$\cdot (Sr)_p = (358)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (418)^*$$

- Aniones en mg/l:

$$\cdot (HCO_3)_p = (359)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (419)^*$$

$$\cdot (SO_4)_p = (360)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (420)^*$$

$$\cdot (NO_3)_p = (361)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (421)^*$$

$$\cdot (Cl)_p = (362)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (422)^*$$

$$\cdot (F)_p = (363)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (423)^*$$

- Otros en mg/l:

$$\cdot (SiO_2)_p = (364)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*) \quad (424)^*$$

$$\cdot (STD)_{p-de} = (413)^* + (414)^* + (415)^* + (416)^* + (417)^* + (418)^* + (419)^* + (420)^* + (421)^* + (422)^* + (423) + (424)^* \quad (425)^*$$

- . Para los que corresponden a $S_{E-8} = 34$ o 37 o 41 m^2 .

- Cationes en mg/l:

- . $(Ca)_p = (366)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*)$ (426)*
- . $(Mg)_p = (367)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*)$ (427)*
- . $(Na)_p = (368)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*)$ (428)*
- . $(K)_p = (369)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*)$ (429)*
- . $(Ba)_p = (370)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*)$ (430)*
- . $(Sr)_p = (371)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*)$ (431)*
- Aniones en mg/l:
 - . $(HCO_3)_p = (372)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*)$ (432)*
 - . $(SO_4)_p = (373)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*)$ (433)*
 - . $(NO_3)_p = (374)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*)$ (434)*
 - . $(Cl)_p = (375)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*)$ (435)*
 - . $(F)_p = (376)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*)$ (436)*
- Otros en mg/l:
 - . $(SiO_2)_p = (377)^* \times ((194)^*o(195)^*) / ((192)^*o(193)^*)$ (437)*
 - . $(STD)_{p-de} = (426)^* + (427)^* + (428)^* + (429)^* + (430)^* + (431)^* + (432)^* + (433)^* + (434)^* + (435)^* + (436)^* + (437)^*$ (438)*
- Estimar el valor del pH del agua producto en las condiciones desfavorables de diseño (pH_{p-desf}), a partir de:

$$pH_{p-desf} = 6,3 + \log([HCO_3]_p / (CO_2)_p).$$
 - . Para los de 4", que corresponden a $S_{E-4} = 6,5 \text{ m}^2$. Calcular:
 - . $[HCO_3]_p = (393)^* \times 0,819$ (439)*
 - . $pH_{p-desf} = 6,3 + \log((439)^* / (49)^*)$ (440)*
 - . Para los de 4", que corresponden a $S_{E-4} = 7,25 \text{ m}^2$. Calcular:
 - . $[HCO_3]_p = (406)^* \times 0,819$ (441)*
 - . $pH_{p-desf} = 6,3 + \log((441)^* / (49)^*)$ (442)*
 - . Para los de 8", que corresponden a $S_{E-8} = 31 \text{ m}^2$. Calcular:
 - . $[HCO_3]_p = (419)^* \times 0,819$ (443)*

. $\text{pH}_{\text{p-desf}} = 6,3 + \log((443)^*/(49)^*)$ (444)*

. Para los de 8", que corresponden a $S_{E-8} = 34$ o 37 o 41 m^2 . Calcular:

. $[\text{HCO}_3]_{\text{p}} = (432)^* \times 0,819$ (445)*

. $\text{pH}_{\text{p-desf}} = 6,3 + \log((445)^*/(49)^*)$ (446)*

NOTA: Para simbología y referencias, ver Capítulo V.

ANEXO 2: Evolución de los parámetros característicos de la planta
(Tablas)

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDV _a microhms/cm	R %	P _a kg/cm ²	PD _{ar} kg/cm ²	F _p lt/m	CDV _p microhms/cm	(LQ/TM)
6	5710	56,1	18,5	2,0	230	270	
49	5840	56,2	18,6	2,0	227	282	TM1
98	5720	57,5	18,8	2,0	230	263	
146	5680	57,3	18,7	2,0	227	251	
190	5610	56,9	18,5	2,0	227	245	
247	5710	56,5	18,5	2,0	225	247	
294	5770	55,3	18,5	2,0	223	250	
343	5700	56,7	18,5	2,0	225	240	
394	5930	56,4	19,0	1,8	224	224	
441	5940	56,7	19,1	2,0	223	226	
496	5750	57,2	19,0	2,0	227	244	
544	5910	57,0	19,2	1,7	225	237	
590	5880	57,1	19,2	1,7	225	234	
649	5930	56,2	19,2	1,7	222	236	
692	5960	57,3	19,3	1,8	224	233	
734	5980	57,1	19,3	1,8	222	240	
781	5730	57,0	19,3	1,8	223	235	
852	5700	57,4	19,4	1,7	225	231	TM2
900	5670	56,9	19,4	1,7	223	220	
942	5490	57,3	19,5	1,5	225	189	
995	5500	57,0	19,5	1,5	223	189	
1046	5470	57,0	19,5	1,5	223	188	
1091	5440	56,8	19,5	1,5	220	186	
1146	5400	56,7	19,5	1,5	223	181	
1194	5420	56,4	19,5	1,5	220	182	
1242	5420	56,4	19,5	1,5	220	182	
1298	5410	56,6	19,7	1,6	223	180	
1345	5400	56,9	19,7	1,6	222	181	
1394	5400	57,0	19,7	1,7	221	181	TM3
1447	5470	55,9	19,7	1,7	219	184	
1496	5460	56,3	19,7	1,7	220	182	
1539	5430	55,8	19,6	1,6	220	178	LQ
1595	5450	57,1	20,0	1,8	224	172	
1642	5450	57,1	20,0	1,8	224	171	
1691	5510	57,0	20,0	1,7	221	173	
1740	5480	56,9	20,0	1,7	223	171	
1793	5500	57,0	20,0	1,7	223	171	
1841	5500	57,0	20,0	1,7	223	168	
1890	5550	57,0	20,0	1,7	223	169	
1944	5610	56,0	20,0	1,5	220	169	
1994	5600	56,7	20,0	1,5	220	169	
2039	5620	56,4	20,0	1,5	219	169	
2085	5630	56,3	20,0	1,5	219	169	
2134	5620	56,4	20,0	1,5	219	169	
2182	5650	56,6	20,0	1,5	218	170	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm ²	PDar kg/cm ²	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
2240	5680	56,5	20,5	1,7	220	168	
2308	5680	60,8	20,0	1,3	278	197	AMPLIACION
2353	5670	60,7	20,0	1,3	276	192	
2401	5660	60,5	20,0	1,3	276	188	
2448	5660	60,3	20,0	1,3	276	186	
2490	5660	60,5	20,0	1,3	276	185	
2542	5660	60,1	20,1	1,2	276	182	
2594	5660	60,5	20,1	1,2	276	179	
2643	5660	59,7	20,0	1,3	272	181	
2691	5660	60,1	20,0	1,3	272	181	
2739	5680	59,9	20,0	1,3	270	184	
2788	5690	59,7	20,0	1,3	271	185	
2842	5730	60,0	20,0	1,3	270	188	
2897	5730	59,6	20,0	1,3	270	187	
2946	5720	59,8	20,0	1,3	271	184	
2992	5720	60,0	20,0	1,3	271	184	
3040	5720	59,8	20,0	1,3	271	181	
3087	5720	59,8	20,0	1,3	271	180	
3135	5700	60,0	20,0	1,3	274	174	
3205	5700	60,2	20,0	1,3	271	168	TM4
3251	5710	60,1	20,0	1,3	273	167	
3300	5710	60,1	20,0	1,3	273	165	
3347	5720	60,0	20,0	1,3	271	165	
3393	5730	59,5	20,0	1,3	269	163	
3441	5710	59,8	20,0	1,3	269	163	
3489	5680	59,6	20,0	1,3	268	163	
3537	5630	59,3	20,0	1,3	265	164	
3591	5630	59,3	20,0	1,3	267	165	
3636	5620	59,4	20,0	1,3	265	164	
3684	5620	59,2	20,0	1,3	265	165	
3731	5610	59,0	20,0	1,3	264	166	
3787	5600	58,8	20,0	1,3	262	166	
3863	5590	58,8	20,0	1,3	263	166	
3909	5590	58,7	20,0	1,3	260	167	
3956	5570	59,2	20,2	1,3	264	165	LQ
4002	5570	60,0	20,0	1,3	276	166	
4050	5580	60,0	20,0	1,3	276	166	
4097	5590	60,0	20,0	1,3	275	165	
4145	5580	60,1	20,0	1,3	276	164	
4194	5620	59,8	20,0	1,3	272	166	
4240	5600	59,9	20,0	1,3	273	163	
4285	5600	59,8	20,0	1,3	272	163	
4333	5600	59,7	20,0	1,3	269	162	
4382	5620	59,2	20,0	1,3	265	160	
4440	5660	58,9	20,5	1,4	261	150	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm2	PDar kg/cm2	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
4484	5660	58,0	20,0	1,4	255	152	
4532	5650	58,0	20,0	1,4	253	148	
4581	5600	57,8	20,0	1,4	252	145	
4648	5490	51,4	19,0	1,4	243	133	LQ
4688	5470	60,4	20,7	1,2	275	137	
4743	5650	59,8	20,7	1,2	269	135	
4786	5580	60,0	20,5	1,3	272	132	
4828	5600	59,7	20,5	1,3	268	133	
4898	5640	59,4	20,3	1,2	260	142	
4952	5600	59,2	20,0	1,2	258	135	
5000	5580	59,9	20,8	1,2	273	132	
5041	5570	59,5	20,7	1,2	266	132	
5112	5570	59,5	20,5	1,2	264	132	
5160	5570	59,0	20,5	1,2	261	132	
5160	5570	59,0	20,5	1,2	261	132	
5202	5560	59,0	20,3	1,2	260	132	
5257	5560	59,4	20,7	1,3	268	131	
5304	5570	59,3	20,7	1,2	265	132	
5352	5560	59,4	20,7	1,2	265	132	
5399	5560	59,4	20,7	1,2	265	132	
5448	5600	59,0	20,6	1,3	261	132	
5501	5600	54,8	19,9	1,4	253	140	TM5
5550	5590	55,5	19,9	1,4	252	140	
5600	5570	55,7	19,9	1,5	254	138	
5647	5540	55,3	19,8	1,5	250	135	
5687	5500	54,5	20,0	1,6	255	133	
5742	5520	55,3	19,9	1,5	250	135	
5788	5520	55,2	19,9	1,6	248	134	
5836	5520	55,1	19,9	1,6	247	134	
5877	5540	55,5	20,1	1,6	255	127	
5941	5540	55,2	19,9	1,6	248	135	
6011	5480	54,0	20,0	1,6	252	129	
6054	5500	55,3	20,0	1,6	250	129	
6107	5530	55,4	20,0	1,6	250	129	
6163	5590	55,2	19,8	1,5	249	130	LQ
6203	5600	55,5	20,0	1,6	251	130	
6258	5610	55,4	19,9	1,6	250	133	
6305	5600	55,4	19,9	1,6	250	131	
6353	5600	55,3	19,9	1,6	249	131	
6406	5520	55,0	20,0	1,6	255	128	
6453	5500	55,6	20,0	1,6	252	127	
6494	5400	55,4	19,9	1,6	250	125	
6540	5310	55,7	20,0	1,6	253	120	
6587	5380	55,5	20,0	1,6	251	123	
6637	5560	55,6	20,1	1,6	253	128	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm ²	PDar kg/cm ²	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
6677	5550	55,4	20,0	1,6	253	128	
6731	5550	55,6	20,0	1,6	252	128	
6782	5570	55,5	20,0	1,6	252	130	
6846	5600	55,3	20,0	1,6	250	133	
6902	5650	55,6	20,1	1,6	252	131	
6949	5690	55,2	20,2	1,6	253	130	
6990	5700	55,7	20,4	1,6	253	131	
7059	5700	55,6	20,4	1,6	253	131	
7100	5700	55,3	20,4	1,6	252	130	
7148	5660	55,4	20,3	1,6	250	130	
7202	5660	55,4	20,4	1,6	250	129	
7247	5600	54,2	20,2	1,6	252	129	
7296	5600	54,3	20,1	1,6	250	130	
7348	5600	53,8	20,0	1,7	244	130	
7410	5600	54,4	20,3	1,6	252	129	
7451	5660	53,8	20,0	1,7	244	132	
7514	5650	53,8	20,0	1,7	244	132	
7561	5640	53,5	20,0	1,7	243	131	
7603	5640	53,6	20,0	1,7	243	131	
7655	5630	53,8	20,0	1,6	244	130	LQ
7693	5700	54,7	19,8	1,8	256	147	
7742	5720	54,4	19,8	1,8	254	148	
7789	5670	54,6	19,8	1,8	260	144	
7838	5670	54,6	19,8	1,8	254	143	
7890	5670	54,7	19,8	1,8	254	143	
7940	5600	54,6	19,7	1,7	259	137	
7987	5700	54,7	19,7	1,8	255	145	
8051	5750	54,8	20,0	1,8	256	145	
8106	5720	54,4	19,8	1,8	255	145	
8144	5780	54,8	20,0	1,9	255	148	
8190	5770	54,6	20,0	1,9	255	148	
8247	5750	54,6	20,0	1,9	254	146	
8289	5750	54,5	20,0	1,9	253	146	
8346	5750	54,5	20,1	1,9	253	144	
8394	5260	54,6	19,8	1,8	254	134	
8436	5500	54,6	20,1	1,9	254	133	
8493	5600	54,3	20,0	1,8	250	138	
8540	5660	54,5	20,1	1,9	252	140	
8594	5710	54,4	20,3	1,8	255	147	
8636	5750	54,5	20,2	1,9	253	147	
8684	5800	54,3	20,3	1,8	254	146	
8732	5880	54,5	20,3	1,8	253	147	
8795	5900	54,0	20,3	1,9	253	147	
8839	5880	54,4	20,3	1,8	253	147	
8907	5800	54,5	20,3	1,8	253	147	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm2	PDar kg/cm2	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
8949	5890	54,2	20,3	1,8	249	150	
9004	5810	54,5	20,4	1,9	253	148	
9043	5800	54,5	20,4	1,9	254	146	
9091	5750	54,5	20,3	1,8	253	146	
9139	5730	54,5	20,3	1,8	253	146	
9193	5820	53,0	19,3	2,0	248	159	
9238	5870	54,6	20,0	2,0	255	159	
9301	6010	54,7	20,2	2,0	257	160	
9343	6000	54,5	20,1	2,0	255	160	
9414	5800	54,6	20,2	2,0	259	153	
9451	5750	54,4	20,2	2,0	257	150	
9505	5700	54,6	20,2	2,0	255	147	
9552	5680	54,6	20,2	2,0	255	145	
9608	5970	54,7	20,5	2,0	256	155	
9651	5970	54,6	20,5	2,0	255	154	
9700	5950	54,4	20,2	2,0	253	157	
9741	5900	54,6	20,2	2,0	255	152	
9795	5960	54,6	20,3	2,0	254	154	
9859	5980	54,5	20,5	2,0	253	154	
9907	5950	54,3	20,3	2,0	252	156	
9962	5930	54,6	20,3	2,0	253	154	
10010	5960	54,6	20,3	1,9	251	157	
10050	6010	54,5	20,6	2,0	253	154	
10105	5890	54,6	20,3	2,0	255	152	
10152	5930	54,6	20,5	2,0	253	155	
10200	5910	54,6	20,5	2,0	254	153	
10247	5940	54,6	20,6	2,0	254	156	
10291	5960	54,7	20,7	2,0	252	154	
10336	6100	54,5	20,8	2,0	252	155	
10401	6030	54,4	20,7	2,0	252	153	
10456	6000	54,3	20,6	2,0	250	153	
10504	6080	54,6	21,0	2,0	253	155	
10544	5910	54,7	20,6	1,9	252	150	
10599	5900	54,7	20,7	2,0	252	150	
10647	5970	54,4	20,7	2,0	249	153	
10695	6100	54,3	20,7	2,0	248	155	LQ
10765	6100	54,9	20,5	2,0	256	155	
10805	6290	54,3	20,5	2,0	250	157	
10849	6330	54,3	20,7	2,0	252	156	
10919	6350	54,3	20,6	2,0	250	157	
10968	6180	54,6	20,5	2,0	254	156	
11015	6260	54,6	20,6	2,0	253	156	
11056	6270	54,6	20,7	2,0	253	155	
11107	6110	54,7	20,6	2,0	253	154	
11156	6100	54,7	20,6	2,0	253	154	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm2	PDar kg/cm2	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
11196	6080	54,5	20,6	2,0	252	153	
11281	6150	54,3	20,7	2,0	250	152	
11297	6050	54,6	20,6	2,0	253	150	
11346	5940	54,7	20,8	2,0	252	147	
11415	6040	54,3	20,7	2,0	248	150	
11463	6040	54,7	21,0	2,0	252	150	
11510	6040	54,3	20,8	2,0	248	151	
11550	6080	54,5	21,0	2,0	250	152	
11603	6050	54,5	21,0	2,0	250	152	
11652	6050	54,4	21,2	2,0	249	150	
11692	6040	54,2	21,0	2,0	247	150	
11770	6030	54,3	21,2	2,0	248	151	
11794	6030	54,3	21,2	2,0	247	151	LQ
11842	6050	54,8	20,5	2,0	254	159	
11913	5940	55,1	20,2	2,0	257	160	
11960	5960	54,8	20,2	2,0	254	163	
12007	5940	54,8	20,3	2,0	254	160	
12027	5920	54,7	20,3	2,0	254	158	
12097	5950	54,5	20,3	2,0	251	159	
12168	6010	54,5	20,5	2,0	252	159	
12209	6000	54,7	20,5	2,0	252	159	
12261	6050	54,5	21,0	2,0	253	157	
12309	6050	54,5	21,0	2,0	252	157	
12340	6050	54,5	21,0	2,0	252	157	
12388	6030	54,7	21,0	2,0	253	156	
12442	6040	54,6	21,0	2,0	252	156	
12488	6040	54,6	21,0	2,0	252	156	
12553	6000	54,6	20,7	2,0	253	158	
12601	6020	54,3	20,7	2,0	250	158	
12645	6010	54,3	20,7	2,0	250	158	
12717	6080	54,3	21,0	2,0	250	158	
12765	6020	54,5	21,0	2,0	253	157	
12813	6070	54,3	21,0	2,0	250	160	
12853	6100	54,3	21,1	2,0	250	158	
12901	6100	54,3	21,2	2,0	248	157	
12971	6090	54,4	21,2	2,0	249	157	
13013	6100	54,4	21,3	2,0	249	157	
13061	6110	54,2	21,2	2,0	246	158	LQ
13114	5970	54,8	20,1	2,0	256	156	
13157	6000	54,8	20,2	2,0	257	162	
13211	6170	54,8	20,7	2,0	257	168	
13257	6200	54,6	20,7	2,0	253	169	
13304	6150	54,7	20,7	2,0	255	166	
13347	6150	54,2	20,4	2,0	251	169	
13424	6100	54,8	20,6	2,0	255	166	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm2	PDar kg/cm2	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
13467	6100	54,7	20,7	2,0	254	166	
13515	6100	54,7	20,8	2,0	255	166	
13568	6120	54,6	21,0	2,0	253	166	
13609	6100	54,8	21,0	2,0	254	165	
13657	6080	54,8	20,8	2,0	253	166	
13710	6090	54,6	21,0	2,0	253	164	
13746	6080	54,8	21,0	2,0	253	165	
13792	6100	54,7	21,0	2,0	252	164	
13863	6150	54,2	20,8	2,0	247	165	
13911	6140	54,5	21,0	2,0	250	163	
13948	6130	54,6	21,0	2,0	250	163	
13990	6140	54,3	21,2	2,0	248	164	
14045	6120	54,5	21,2	2,0	250	163	
14089	6100	54,6	21,2	2,0	251	163	
14155	6130	54,2	21,2	2,0	247	165	
14208	6130	54,2	21,3	2,0	247	164	
14253	6150	54,0	21,3	2,0	246	162	TM6
14311	6150	54,0	21,3	2,0	245	162	
14336	6120	54,3	21,3	2,0	248	161	
14405	6110	54,3	21,3	2,0	248	160	
14441	6120	54,0	21,3	2,0	246	161	
14494	6000	54,7	21,3	2,0	252	159	
14543	6090	54,8	21,3	2,0	249	159	LQ
14606	5870	55,0	20,5	2,0	258	158	
14676	5870	54,9	20,5	2,0	258	158	
14707	5900	54,7	20,5	2,0	256	159	
14754	5920	54,6	20,5	2,0	254	160	
14794	5930	54,6	20,5	2,0	253	160	
14844	5950	54,6	20,5	2,0	251	162	
14896	5950	54,7	20,6	2,0	252	162	
14958	5900	54,7	21,0	2,0	256	161	
14994	5920	54,5	21,0	2,0	253	161	
15036	5950	54,2	21,0	2,0	249	161	
15096	5940	54,4	21,0	2,0	249	161	
15144	6130	54,4	21,2	2,0	249	169	
15216	5800	54,1	20,6	2,0	248	160	
15263	6180	54,3	21,0	2,0	250	171	
15304	6210	54,3	21,0	2,0	248	173	
15353	6000	54,5	21,0	2,0	252	170	
15407	6200	54,3	21,0	2,0	248	172	
15447	6150	54,3	21,0	2,0	247	168	
15488	6130	54,3	21,1	2,0	248	166	
15541	6130	54,4	21,2	2,0	249	165	
15605	6300	54,0	21,3	2,0	244	172	
15651	6280	54,0	21,3	2,0	244	171	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm2	PDar kg/cm2	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
15696	6280	53,9	21,3	2,0	243	171	
15750	6250	54,0	21,3	2,0	244	170	
15798	6230	54,0	21,3	2,0	243	169	
15859	6220	54,0	21,3	2,0	243	169	
15887	6240	54,0	21,4	2,0	243	168	
15964	6230	53,9	21,4	2,0	243	168	
16006	6180	54,5	21,4	2,0	250	167	
16059	6320	54,1	21,3	2,0	244	170	LQ
16109	5900	55,0	21,1	2,0	258	162	
16150	5910	54,8	21,0	2,0	253	164	
16205	5840	54,8	21,0	2,0	257	161	
16246	5900	54,6	21,0	2,0	254	162	
16293	5930	54,5	21,0	2,0	253	165	
16347	5850	54,6	21,0	2,0	255	161	
16394	6080	54,3	21,0	2,0	250	170	
16457	5900	54,5	21,0	2,0	253	163	
16511	5950	54,5	21,0	2,0	252	165	
16549	6270	54,4	21,1	2,0	248	175	
16608	6200	54,4	21,1	2,0	249	173	
16662	5590	54,8	20,8	2,0	255	145	
16707	5900	54,3	21,0	2,0	250	164	
16759	6000	54,3	21,1	2,0	248	167	
16814	6350	54,2	21,2	2,0	246	175	
16853	6310	54,5	21,2	2,0	248	173	
16902	6280	54,4	21,3	2,0	249	171	
16930	6290	54,2	21,3	2,0	245	173	
17004	6200	54,3	21,3	2,0	248	170	
17044	6200	54,3	21,3	2,0	247	170	
17092	6290	53,8	21,3	2,0	240	175	
17142	6280	53,9	21,3	2,0	243	174	
17190	6270	54,0	21,3	2,0	245	174	
17254	6260	53,9	21,2	2,0	244	174	LQ
17295	5670	54,1	19,9	2,0	255	154	
17333	5750	54,4	20,2	2,0	254	157	
17408	5800	54,7	20,5	2,0	255	157	
17449	5900	54,8	21,0	2,0	256	163	
17493	6180	54,4	21,0	2,0	249	172	
17539	6200	54,2	20,9	2,0	247	178	
17590	6210	54,4	21,0	2,0	248	177	
17629	6230	54,3	21,1	2,0	250	177	
17705	6180	54,6	21,0	2,0	253	177	
17753	6300	54,3	20,8	2,0	248	180	
17792	6250	54,4	21,1	2,0	251	177	
17866	6300	54,0	21,2	2,0	245	182	
17904	6300	54,0	21,2	2,0	245	182	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm2	PDar kg/cm2	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
17950	6280	54,0	21,2	2,0	244	182	
18002	6290	54,0	21,2	2,0	242	182	
18041	6180	54,2	21,2	2,0	247	178	
18094	6260	53,9	21,2	2,0	244	180	
18168	6300	53,7	21,2	2,0	240	183	
18198	6300	54,0	21,3	2,0	244	182	
18252	6310	54,0	21,3	2,0	242	184	
18300	6250	53,9	21,2	2,0	243	182	
18353	6130	53,8	21,1	2,0	242	178	
18394	6080	54,0	21,1	2,0	246	176	
18446	6200	54,0	21,3	2,0	243	180	
18508	6320	53,9	21,3	2,0	242	185	
18563	6300	53,8	21,3	2,0	241	184	
18606	6230	53,9	21,3	2,0	242	183	
18654	6200	53,9	21,4	2,0	241	180	
18694	6080	53,5	21,3	2,0	240	176	
18740	5980	52,9	21,2	2,0	235	172	LQ
18811	6000	54,4	20,7	2,0	251	175	
18862	5970	54,3	20,5	2,0	250	174	
18914	5800	54,3	20,5	2,0	250	170	
18943	5660	54,5	20,3	2,0	253	164	
19014	5790	54,2	20,4	2,0	249	170	
19061	5700	54,2	20,2	2,0	248	170	
19092	5900	54,0	20,5	2,0	244	174	
19154	5950	53,7	20,5	2,0	244	175	
19198	5830	54,1	20,5	2,0	248	174	
19262	5900	53,7	20,6	2,0	241	174	
19315	5800	53,9	20,6	2,0	243	173	
19357	5830	53,8	20,8	2,0	243	172	
19412	4950	53,0	21,6	2,8	262	102	
19458	5000	53,4	22,0	2,7	265	101	
19501	5080	53,2	21,2	2,6	253	103	
19549	5100	52,6	21,0	2,7	250	110	
19593	5140	53,7	22,0	2,4	259	108	
19640	5200	53,5	22,1	2,5	259	110	
19692	5270	53,7	22,2	2,3	260	111	
19753	5180	53,8	22,0	2,3	262	110	
19801	5200	53,8	22,2	2,4	262	110	
19849	5200	53,9	22,2	2,3	262	110	
19890	5550	53,9	23,0	2,4	263	117	
19938	5590	52,8	22,0	2,6	250	119	
19991	5620	53,4	22,2	2,2	252	118	
20048	5600	53,2	22,2	2,2	252	118	
20101	5550	53,1	22,8	2,6	254	116	LQ
20138	5650	53,1	21,5	2,7	253	135	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm2	PDar kg/cm2	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
20190	5700	53,4	22,0	2,5	260	135	
20266	5500	54,0	21,8	2,4	265	122	
20307	5620	53,0	21,3	2,3	256	135	
20347	5500	53,3	21,0	2,4	255	130	
20388	5600	53,1	21,8	2,4	255	130	
20451	5540	53,1	21,0	2,4	253	131	
20503	5650	53,1	22,0	2,4	254	131	
20540	5790	53,2	22,2	2,4	254	131	
20596	5700	53,2	22,1	2,3	254	130	
20663	5700	53,2	22,1	2,3	254	131	
20701	5650	53,4	22,2	2,4	259	130	
20748	5690	53,2	22,1	2,5	254	131	
20795	5730	53,2	22,2	2,4	254	132	
20844	5850	53,5	22,7	2,6	257	135	
20907	5800	53,0	22,5	2,5	252	134	
20954	5640	53,4	22,6	2,5	254	130	
21020	5650	53,3	22,7	2,6	252	130	
21068	5680	53,3	23,0	2,7	250	129	
21113	5680	53,2	22,8	2,6	249	130	
21161	5670	53,1	22,7	2,6	248	130	
21207	5660	53,0	22,6	2,6	248	130	
21255	5650	52,9	22,5	2,6	247	130	
21303	5640	53,1	23,0	2,7	253	129	
21350	5680	53,1	23,1	2,8	253	131	
21422	5800	53,4	23,8	2,8	256	135	LQ
21470	5600	53,2	22,2	2,7	254	134	
21518	5580	53,2	22,1	2,6	254	134	
21565	5530	53,0	23,0	2,9	261	133	LQ
21607	5630	53,0	22,1	2,5	260	135	
21662	5620	53,0	22,1	2,5	260	134	
21675	5730	53,1	22,7	2,7	262	137	
21758	5820	52,9	22,8	2,7	260	140	
21802	5680	53,1	22,2	2,6	260	138	
21850	6340	53,1	23,0	2,8	257	158	
21888	6300	53,1	23,0	2,8	257	157	
21955	6530	53,4	23,0	2,8	254	160	TM7
22000	6300	53,2	23,0	2,8	257	157	
22048	6360	53,2	23,1	2,8	255	157	
22093	6000	53,2	22,5	2,6	251	150	
22141	6100	53,0	22,7	2,7	252	152	
22188	6450	53,3	23,2	2,8	256	165	
22236	6500	53,2	23,3	2,8	254	165	
22305	6480	53,2	23,3	2,8	254	165	
22353	5600	53,1	22,2	2,6	261	140	
22400	6140	53,3	23,0	2,7	258	160	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm2	PDar kg/cm2	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
22448	6380	53,2	23,2	2,9	261	162	
22496	6530	53,2	23,2	2,9	259	168	
22544	6840	53,2	23,3	2,8	258	171	
22591	6610	53,3	23,3	2,9	259	170	
22639	6500	53,4	23,3	2,8	258	163	
22687	6560	53,2	23,3	2,8	256	167	
22735	6700	53,2	23,9	2,9	254	170	
22806	6710	53,2	23,9	2,9	254	172	
22855	6800	53,3	24,0	2,9	252	174	
22892	6600	53,2	23,2	2,9	260	172	
22961	6280	53,4	23,5	2,8	256	163	LQ
22994	5720	53,2	22,2	2,7	261	150	
23048	5890	53,2	23,2	2,7	259	154	
23096	6000	53,1	23,2	2,6	258	156	
23159	6180	53,3	23,7	2,8	262	157	
23213	6250	53,3	23,7	2,8	259	160	
23260	6330	53,3	23,8	2,8	259	163	
23308	6520	53,3	23,9	2,8	258	168	
23350	6760	53,2	24,0	2,7	254	170	
23399	6070	53,2	23,3	2,8	261	160	
23443	6200	53,3	23,3	2,8	259	155	
23509	6350	53,3	23,8	2,8	257	160	
23563	6340	53,4	23,9	2,8	257	160	
23611	6150	53,3	23,2	2,8	259	152	
23639	6170	53,4	23,2	2,8	259	149	
23706	6200	53,3	23,2	2,7	257	151	
23753	6230	53,4	23,3	2,6	256	153	
23795	6400	53,3	23,3	2,6	251	158	
23848	6350	53,3	24,0	2,8	257	158	
23895	6200	53,3	23,4	2,6	255	155	
23943	6320	53,3	24,0	2,6	251	158	
24014	6310	53,2	24,0	2,6	250	157	
24062	6300	53,3	24,0	2,6	249	160	
24109	6260	53,2	24,0	2,7	249	160	
24150	6240	53,3	24,0	2,7	249	158	
24204	6290	53,0	24,0	2,8	246	160	
24250	6260	53,2	24,0	2,7	246	157	
24299	6210	53,2	23,9	2,7	247	154	
24350	6180	52,4	23,7	2,9	248	155	
24398	5880	53,2	22,2	2,6	261	154	
24439	5920	53,3	23,0	2,6	257	159	
24493	5970	53,1	23,0	2,5	256	160	
24538	6050	53,1	23,0	2,5	254	161	
24606	6110	53,0	23,5	2,6	253	163	
24659	6000	53,3	23,5	2,5	253	159	TM8

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm2	PDar kg/cm2	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
24705	5800	53,3	23,0	2,6	256	150	
24746	6100	53,3	23,8	2,6	255	160	
24801	5930	53,3	23,8	2,6	255	155	
24848	5900	53,3	23,8	2,6	254	153	
24918	6390	53,2	23,8	2,3	249	165	
24948	5450	53,7	23,3	2,3	253	139	LQ
24979	5700	53,1	22,5	2,7	258	153	
25046	5760	53,2	23,0	2,6	257	152	
25100	5770	53,3	23,0	2,6	255	153	
25166	5790	53,3	23,0	2,5	253	153	
25210	5790	53,4	23,0	2,4	252	154	
25258	5840	53,4	23,2	2,4	252	155	
25311	5800	53,9	23,5	2,5	254	153	
25353	5820	53,7	23,5	2,5	251	153	
25420	5700	54,1	23,2	2,4	254	147	TM9
25467	5680	53,8	23,2	2,4	253	147	
25509	5820	53,7	23,5	2,5	251	152	
25562	6380	53,6	23,8	2,3	248	165	
25608	6130	53,7	23,8	2,4	250	163	LQ
25658	5500	51,4	19,8	2,0	220	152	
25708	5480	52,4	19,8	2,0	218	154	
25749	5670	53,7	22,7	2,5	255	150	
25789	6060	53,8	23,3	2,3	250	161	
25833	5770	53,7	23,0	2,5	255	151	
25905	6230	53,5	23,8	2,5	252	164	
25944	6170	53,7	23,3	2,5	253	163	
26008	6000	53,2	23,0	2,5	250	160	
26053	5570	53,3	22,5	2,5	252	150	
26094	6300	53,1	23,3	2,5	249	158	
26149	6150	53,3	23,3	2,5	251	157	
26197	6200	53,3	23,5	2,5	249	160	
26250	6190	53,2	23,5	2,6	250	159	
26297	6240	53,1	23,5	2,6	247	162	
26352	6260	53,2	23,5	2,5	246	163	
26399	6410	53,2	23,8	2,5	246	170	
26441	6400	53,1	23,8	2,5	245	169	
26486	6380	53,0	23,5	2,5	244	167	
26525	5620	53,2	22,1	2,6	256	152	
26572	6430	53,3	22,7	2,5	251	180	
26621	6450	53,2	22,6	2,4	248	179	
26692	6710	52,9	22,7	2,4	246	186	
26740	5820	53,1	23,0	2,5	254	160	
26789	6330	53,2	23,5	2,4	249	173	TM10
26834	6200	53,3	23,5	2,4	251	169	
26888	5890	53,4	22,8	2,5	253	161	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm2	PDar kg/cm2	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
26955	6090	53,2	23,2	2,4	249	165	
27003	5910	53,2	23,0	2,4	249	160	
27050	5760	53,2	22,5	2,5	251	155	
27090	6140	53,2	23,3	2,4	248	164	
27146	6300	53,3	23,5	2,4	245	170	
27188	6290	53,3	23,5	2,4	245	169	
27241	6270	52,9	23,5	2,5	244	167	
27289	6210	53,3	23,5	2,4	248	168	
27330	6150	53,0	23,5	2,4	244	165	
27378	6070	52,8	23,3	2,3	242	162	
27425	6100	53,2	23,5	2,4	248	163	
27525	6320	53,2	23,8	2,3	244	169	
27560	5830	53,0	23,3	2,3	244	154	
27620	6310	53,0	23,8	2,3	243	167	
27673	6120	53,2	23,5	2,3	244	161	
27720	6180	53,0	23,5	2,3	242	160	
27761	5840	53,2	23,3	2,3	243	151	
27823	5810	52,5	23,2	2,6	244	150	
27863	5830	52,8	23,2	2,6	242	150	
27919	5800	53,0	23,2	2,3	241	150	
27961	5740	53,1	23,2	2,6	246	151	
28009	5740	53,1	23,2	2,6	245	150	
28036	5760	53,0	23,2	2,4	243	152	
28100	5780	53,0	23,2	2,3	241	152	
28153	6080	53,2	23,5	2,3	244	159	
28198	6100	53,0	23,5	2,3	241	162	
28241	6100	52,7	23,5	2,4	240	163	
28285	6080	52,8	23,5	2,4	241	163	
28330	6070	52,7	23,5	2,4	240	162	
28378	6050	52,9	23,5	2,4	240	161	
28464	5750	52,9	23,2	2,5	242	153	
28510	5880	52,8	23,5	2,5	241	157	
28552	6000	52,4	23,8	2,5	235	161	LQ
28587	6650	53,1	23,0	2,4	247	183	
28635	6700	53,3	23,0	2,3	245	184	
28680	5670	53,3	22,0	2,5	252	153	
28749	6230	52,7	22,3	2,4	244	167	
28784	6310	52,6	22,3	2,4	242	167	
28839	6030	53,0	22,2	2,4	246	160	
28885	6190	52,7	22,2	2,4	242	163	
28942	6140	52,6	22,2	2,4	242	161	
28986	5900	52,8	22,2	2,4	244	155	TM11
29034	6000	52,5	22,2	2,4	241	156	
29080	5210	53,3	22,3	2,3	248	135	
29144	5720	52,7	22,2	2,4	243	149	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm ²	PDar kg/cm ²	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
29191	5920	52,6	22,2	2,4	240	160	
29230	6170	52,9	22,8	2,3	238	170	
29300	6320	52,8	23,0	2,3	237	174	
29348	5570	53,0	22,8	2,4	235	147	
29414	6380	52,5	22,8	2,4	231	171	
29444	6620	52,5	23,0	2,4	230	179	
29482	6600	52,9	23,2	2,5	236	179	
29530	6610	52,9	23,2	2,5	235	180	
29578	6540	52,7	23,0	2,5	233	178	
29638	6610	52,6	23,0	2,5	231	180	
29680	6250	52,8	22,8	2,5	232	172	
29744	6720	52,5	23,2	2,5	230	186	
29790	6700	52,4	23,2	2,6	230	186	
29838	6890	52,1	23,2	2,5	225	193	
29906	6930	51,9	23,3	2,6	226	196	
29950	6840	51,9	23,2	2,6	226	194	
29991	6800	52,1	23,2	2,5	224	193	
30037	5870	52,2	22,1	2,5	241	166	
30083	6270	52,3	22,2	2,5	237	176	
30151	5070	52,4	22,2	2,9	259	129	
30204	5910	52,5	23,8	3,0	261	162	
30248	6230	52,4	24,3	2,9	259	171	
30295	6060	52,6	24,2	2,9	261	165	
30343	6150	52,5	25,0	2,9	260	168	TM12
30387	6270	52,5	25,2	2,9	260	171	
30436	6290	52,4	25,2	2,9	258	171	
30503	6240	52,6	25,3	2,9	260	168	
30550	6330	52,5	25,5	2,9	260	170	LQ
30607	6220	52,6	24,8	2,9	260	166	
30654	6200	52,5	25,0	2,9	260	165	
30702	6350	52,5	25,5	2,9	259	169	
30750	6010	52,6	24,0	2,9	260	160	
30797	6220	52,5	25,0	2,9	260	166	
30836	6020	52,5	24,1	2,9	260	160	
30882	6100	52,4	24,2	3,0	260	161	
30930	6000	52,5	24,1	2,9	260	157	
30975	6560	52,5	25,2	3,0	261	170	
31043	6610	52,0	25,5	3,1	259	171	
31090	6590	52,0	25,5	3,1	259	171	
31143	6600	52,5	26,0	3,0	260	172	
31191	6620	52,5	26,0	3,0	260	172	
31235	6580	52,5	26,0	3,0	260	171	
31314	6550	53,0	26,1	2,8	259	171	
31350	6700	52,5	27,0	3,0	260	176	
31400	6690	52,0	27,1	3,1	258	176	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm2	PDar kg/cm2	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
31437	5970	52,0	24,2	3,1	260	157	
31485	6050	52,1	24,3	3,1	260	159	
31540	6550	52,0	25,8	3,1	260	170	
31612	6520	52,0	26,0	3,2	262	169	
31654	6640	52,0	26,5	3,2	260	172	
31702	6760	52,0	27,2	3,2	260	173	
31750	6200	53,5	25,0	2,6	260	180	
31798	6210	53,5	25,5	2,6	260	180	
31845	6260	53,5	26,0	2,6	260	181	
31892	6240	53,6	25,9	2,6	261	181	
31940	6310	53,5	27,1	2,6	261	180	
31986	6180	52,0	25,5	3,1	261	175	
32033	6200	52,5	26,0	3,0	260	174	
32081	7000	52,5	27,0	3,0	262	203	
32154	6730	52,5	27,2	3,0	261	192	
32202	6500	52,5	27,2	3,0	260	180	
32248	6340	52,5	28,0	3,0	260	175	
32296	6210	52,5	28,0	3,0	260	172	
32344	6070	52,5	28,0	3,0	260	168	
32392	6030	52,5	28,0	3,0	261	168	
32439	6280	52,5	29,0	3,0	261	173	
32486	6350	52,5	29,5	3,0	260	175	
32534	6400	51,3	29,5	3,2	256	178	
32582	6000	51,3	29,0	3,2	256	168	
32630	6170	50,7	29,2	3,2	250	173	LQ
32678	5720	51,5	25,0	3,1	255	166	
32750	5500	51,6	24,2	3,1	256	158	
32797	5800	51,4	25,5	3,2	256	165	
32845	5800	51,4	25,5	3,2	256	165	
32892	5880	51,3	25,8	3,3	257	167	
32931	5830	51,2	25,4	3,2	252	165	TM13
32977	5340	51,1	23,5	3,3	252	151	
33046	5810	51,2	25,4	3,2	252	165	
33094	6150	51,1	25,7	3,3	252	175	
33140	6000	51,2	25,6	3,2	252	173	
33187	6000	51,1	25,7	3,3	252	172	
33235	5980	51,2	25,7	3,2	252	170	
33283	5990	51,2	25,8	3,3	252	170	
33328	5630	51,2	25,0	3,3	252	158	
33399	6030	51,2	25,9	3,3	252	163	
33447	5800	51,1	25,4	3,4	252	160	
33492	5770	51,1	25,4	3,4	252	160	
33540	5930	51,2	25,8	3,4	253	166	
33588	5820	51,2	25,4	3,4	252	168	
33658	5900	50,5	25,8	3,6	246	175	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm2	PDar kg/cm2	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
33705	6190	50,5	25,9	3,5	243	180	
33750	6100	50,5	26,0	3,5	244	176	
33797	6100	50,5	26,0	3,5	243	176	
33845	6070	50,6	26,2	3,5	244	174	
33893	6110	50,6	26,5	3,5	244	173	
33941	6000	50,6	26,5	3,5	244	168	
33985	5920	50,6	26,5	3,5	244	163	
34033	5880	50,6	26,8	3,5	245	160	
34081	5850	51,5	26,7	3,2	244	165	
34151	6100	51,5	27,0	3,2	243	172	
34198	5680	51,5	26,0	3,2	244	157	
34246	5970	51,6	27,0	3,2	245	168	
34293	6210	51,7	27,5	3,2	244	173	
34340	5500	51,7	25,9	3,2	247	150	
34387	5570	52,0	26,0	3,2	246	153	
34435	5900	52,0	27,0	3,2	247	163	
34483	6100	52,0	27,3	3,3	248	168	
34553	6120	51,3	27,7	3,5	247	168	
34600	6150	51,5	28,0	3,5	246	169	
34648	6000	52,1	28,1	3,3	247	166	
34696	6200	52,5	28,5	3,2	247	173	
34741	5900	52,5	28,0	3,2	247	164	
34789	6100	52,6	28,7	3,2	247	172	
34836	6000	52,6	28,7	3,2	247	170	
34884	5810	52,5	29,0	3,2	245	166	LQ
34931	5200	54,5	24,1	2,4	247	152	
34979	5300	54,5	24,2	2,4	247	154	
35027	5340	53,5	24,7	2,6	247	154	
35097	5300	53,4	25,0	2,6	247	153	
35145	5000	55,0	24,2	2,2	248	144	
35193	5050	54,0	24,5	2,5	247	144	
35240	5220	53,4	25,2	2,6	248	148	
35288	5180	53,4	25,0	2,6	248	146	
35336	5110	53,4	24,7	2,6	248	144	
35408	5500	53,4	25,5	2,6	248	156	TM14
35456	5570	53,4	26,0	2,6	248	158	
35503	5600	53,4	26,0	2,6	247	160	
35550	5700	53,4	26,1	2,6	248	163	
35597	5630	53,4	26,1	2,6	248	160	
35645	5550	53,4	26,1	2,6	248	156	
35693	5560	53,5	26,5	2,5	249	155	
35740	5510	53,5	26,5	2,5	248	153	
35786	5360	53,5	26,3	2,5	249	146	
35834	5600	53,4	27,0	2,7	249	151	
35880	5640	53,0	27,2	3,0	249	151	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm2	PDar kg/cm2	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
35951	5700	53,0	27,7	3,0	249	153	
35999	5700	53,1	27,8	2,9	249	155	
36047	5540	53,1	27,5	2,9	249	152	
36094	5480	53,4	28,0	2,8	249	153	
36142	5410	53,4	28,0	2,8	249	152	
36190	5400	53,4	28,0	2,8	249	151	
36235	5390	53,4	28,0	2,8	249	151	
36305	5400	53,4	28,0	2,8	249	150	
36352	5460	53,5	28,1	2,7	249	151	
36400	5400	53,5	28,0	2,8	249	149	
36448	5380	53,5	28,0	2,8	249	147	
36496	5170	53,5	27,0	2,8	249	141	
36543	5450	53,5	28,1	2,8	249	148	
36591	5440	53,5	28,1	2,8	249	147	LQ
36638	5400	58,8	25,0	2,0	250	171	
36686	5400	58,8	25,2	2,1	252	169	
36734	5420	58,9	25,3	2,1	253	168	
36805	5420	58,7	25,0	2,0	249	167	
36853	5410	58,7	25,0	2,0	249	167	
36899	5400	58,7	25,0	2,0	249	166	
36946	5300	58,8	24,7	2,0	250	163	
36993	5330	58,8	24,8	2,0	250	163	
37040	5400	58,7	25,0	2,0	249	164	
37087	5410	58,7	25,0	2,0	249	161	
37158	4910	58,6	24,7	2,0	248	141	
37205	6000	58,6	25,5	2,0	248	177	
37253	5900	58,7	25,2	2,0	249	174	
37301	5400	58,6	25,0	2,0	248	160	
37346	5850	58,7	25,2	2,0	249	175	
37393	5810	58,7	25,2	2,0	249	170	
37440	5800	58,6	25,2	2,0	248	170	
37487	5830	58,7	25,2	2,0	249	174	TM15
37535	5610	58,7	25,5	2,0	249	164	
37604	5460	58,7	25,8	2,0	249	160	
37651	5490	58,6	25,9	2,0	248	163	
37698	5630	58,6	26,0	2,0	248	164	
37746	5600	58,6	26,0	2,0	248	163	
37794	5590	58,6	26,0	2,0	248	163	
37840	5620	58,6	26,0	2,0	248	163	
37887	5650	58,6	26,0	2,0	248	164	
37935	6220	58,6	26,1	2,0	248	182	
37983	6590	58,7	26,2	2,0	249	196	
38052	6250	58,7	26,2	2,0	249	183	
38100	5870	58,6	26,5	2,0	248	172	
38147	5380	58,6	27,0	2,2	250	156	

TABLA T-VII/1:
EVOLUCIÓN PARÁMETROS PLANTA

t horas	CDVa microhms/cm	R %	Pa kg/cm2	PDar kg/cm2	Fp lt/m	CDVp microhms/cm	(LQ/TM)
38195	5300	58,4	27,0	2,2	248	155	
38242	5360	58,5	27,2	2,2	249	156	
38290	5430	59,5	28,0	2,2	257	156	
38338	5410	59,6	28,0	2,1	257	156	
38407	5640	59,5	28,3	2,2	257	162	
38454	5770	59,5	28,4	2,2	257	164	
38502	5830	59,5	28,5	2,2	257	166	
38548	6010	59,5	28,6	2,2	257	171	
38595	5710	59,5	28,6	2,2	257	165	
38643	5640	59,5	28,8	2,2	257	160	LQ
38691	5550	59,5	25,8	1,9	258	168	
38754	5570	59,2	26,0	2,0	256	168	TM16
38785	5530	59,3	26,0	2,0	257	165	
38832	5450	59,6	26,0	2,0	259	162	
38879	5420	59,3	25,9	2,0	257	160	
38950	5460	59,3	26,0	2,0	257	160	
38997	5380	59,5	26,2	2,0	260	154	
39045	5400	59,4	26,0	2,0	258	154	
39093	5410	59,4	26,0	2,0	258	154	
39140	5380	59,3	26,0	2,0	257	153	
39188	5600	59,4	26,2	2,0	258	159	
39234	5540	59,1	26,0	2,0	255	158	
39282	5490	59,3	26,5	2,0	257	156	
39330	5230	59,4	26,3	1,8	254	151	
39400	5300	59,4	26,4	1,9	257	154	
39447	5330	59,3	26,5	2,0	257	155	
39494	5210	59,3	26,0	2,0	257	151	
39542	5310	59,4	26,5	2,0	258	154	
39590	5570	59,4	26,7	2,0	258	160	
39662	5180	59,3	26,2	1,9	255	150	
39710	5220	59,3	26,3	2,0	257	151	
39745	5400	59,3	26,5	2,0	257	157	TM17
39789	5240	59,3	26,2	2,0	257	153	
39837	5520	59,3	27,0	2,0	257	160	
39884	5390	59,3	26,7	1,9	256	157	
39955	5440	59,3	27,0	2,0	257	158	
40002	5250	59,3	26,6	2,0	257	150	

NOTA: Para simbología y referencias, ver Capítulo VII.

ANEXO 3: Evolución de los parámetros característicos de la planta
(Gráficos).

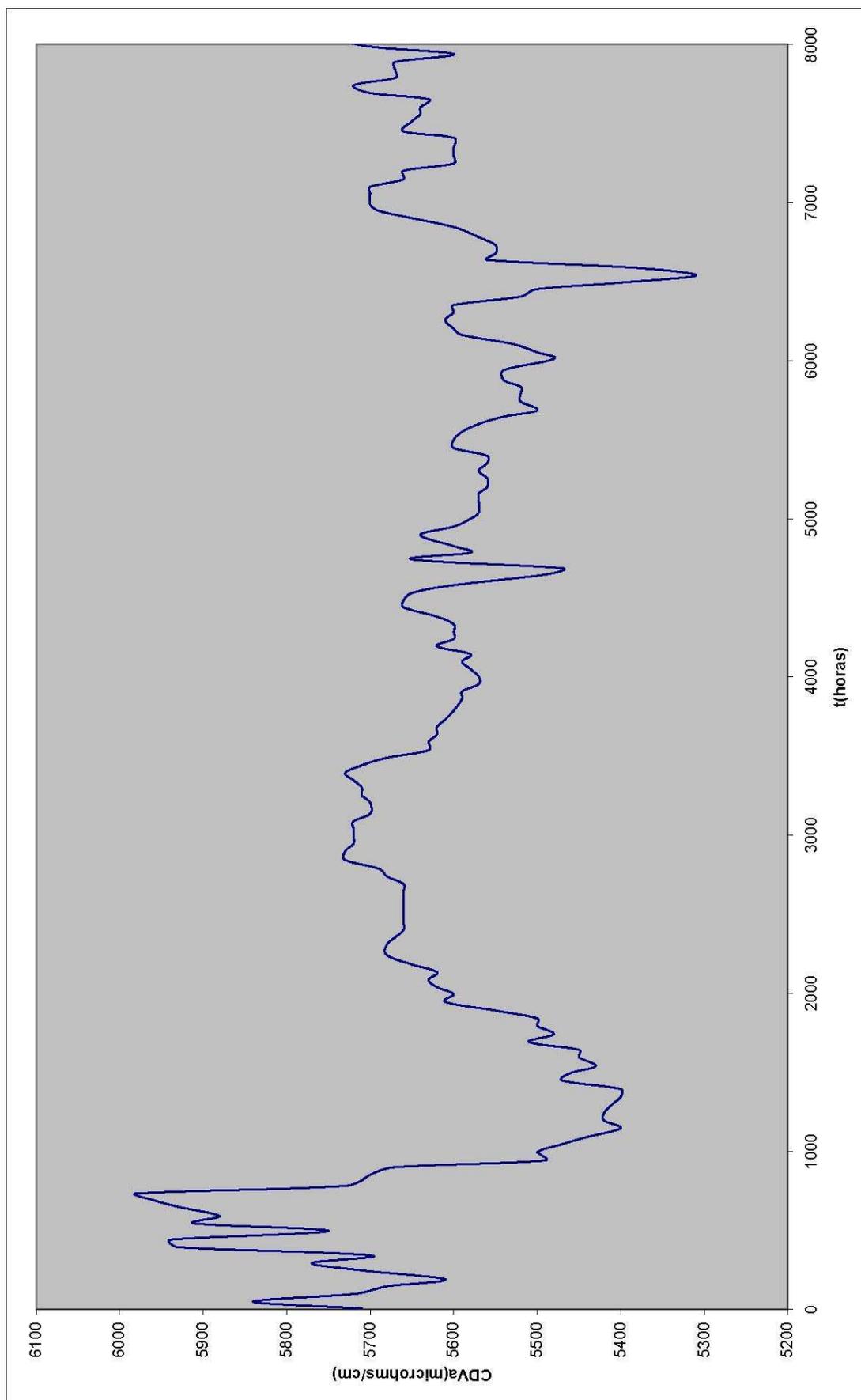


FIGURA F-VII/1: CONDUCTIVIDAD ALIMENTACION (1/5)

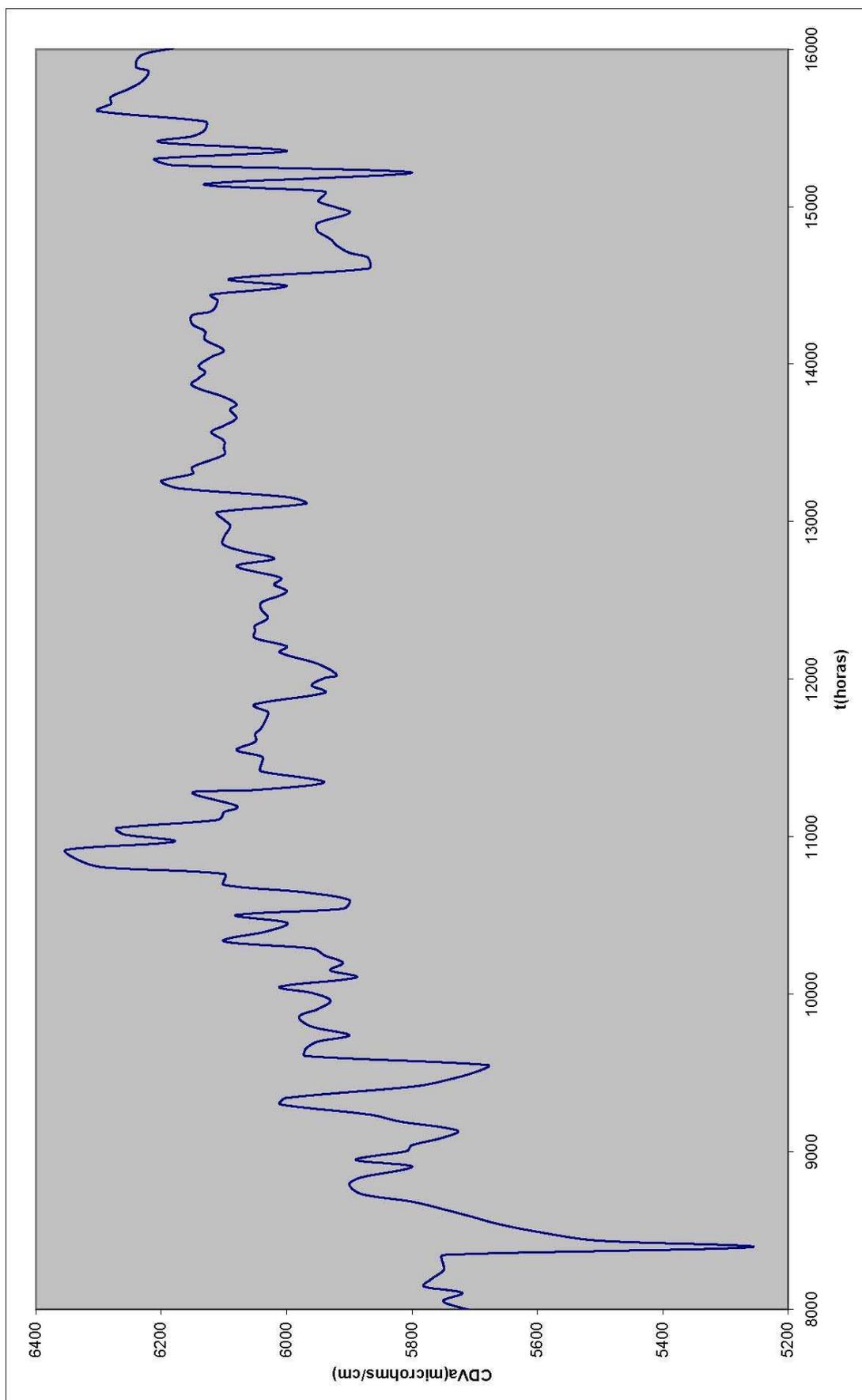


FIGURA F-VII/1: CONDUCTIVIDAD ALIMENTACION (2/5)

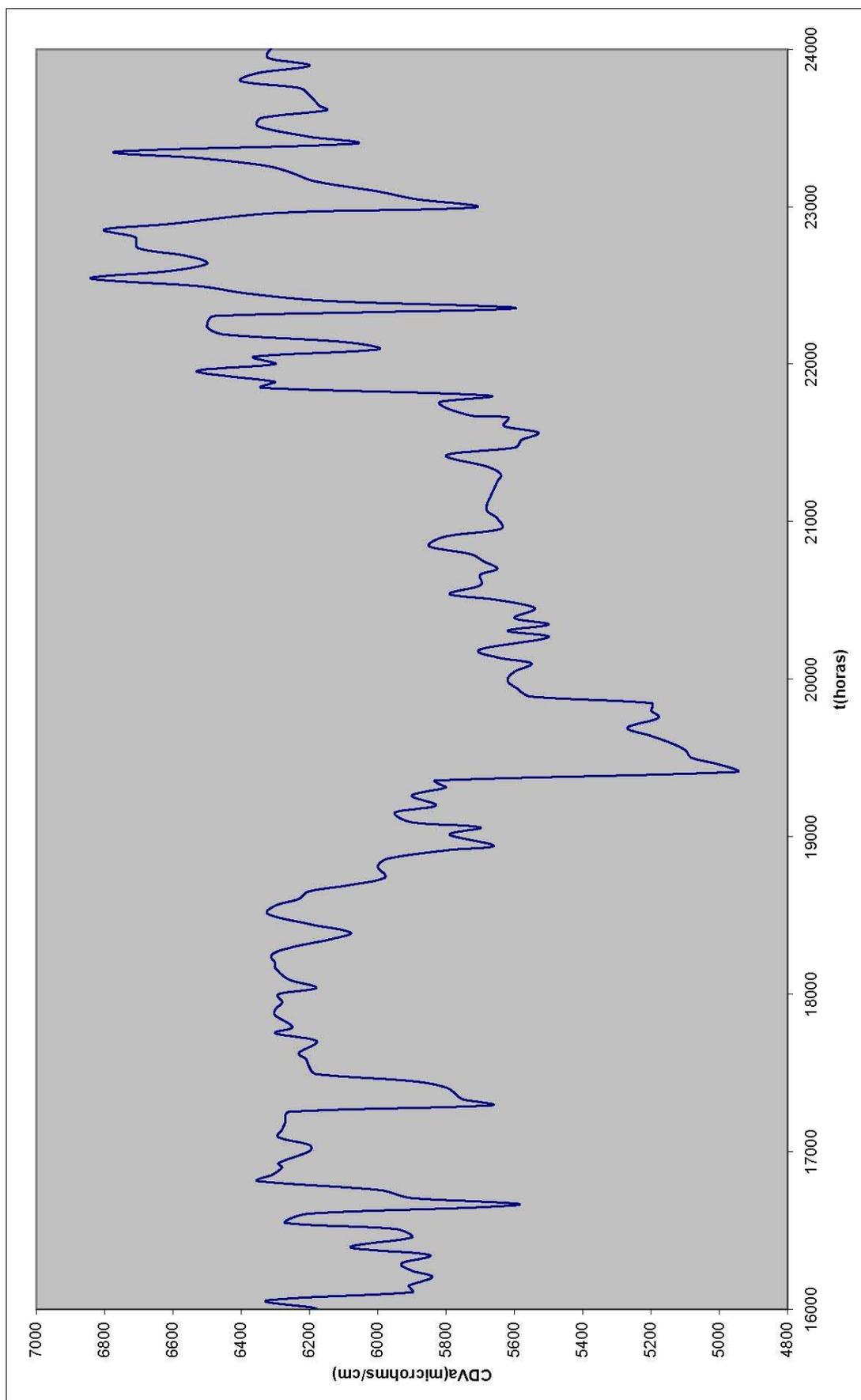


FIGURA F-VII/1: CONDUCTIVIDAD ALIMENTACION (3/5)

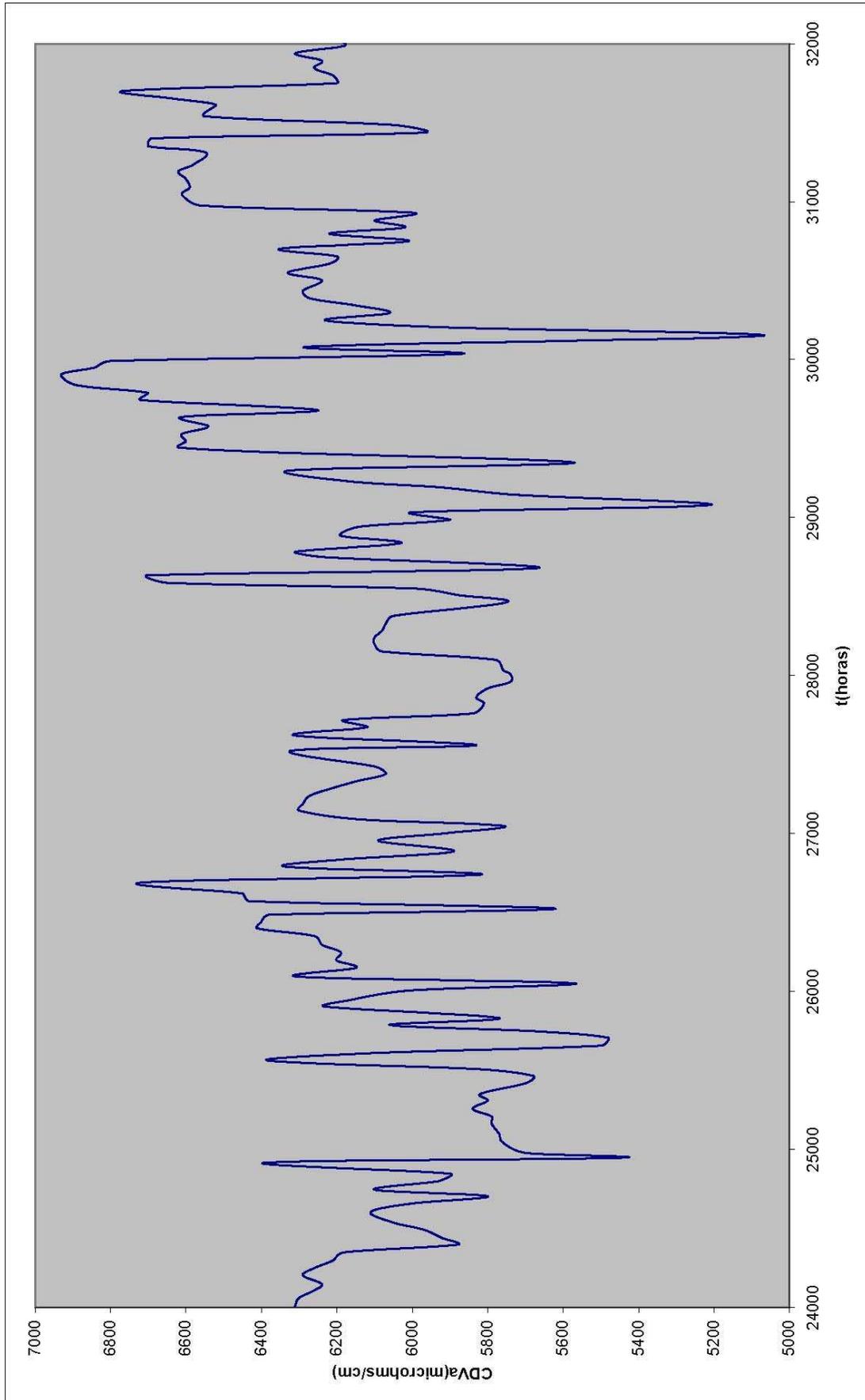


FIGURA F-VII/1: CONDUCTIVIDAD ALIMENTACION (4/5)

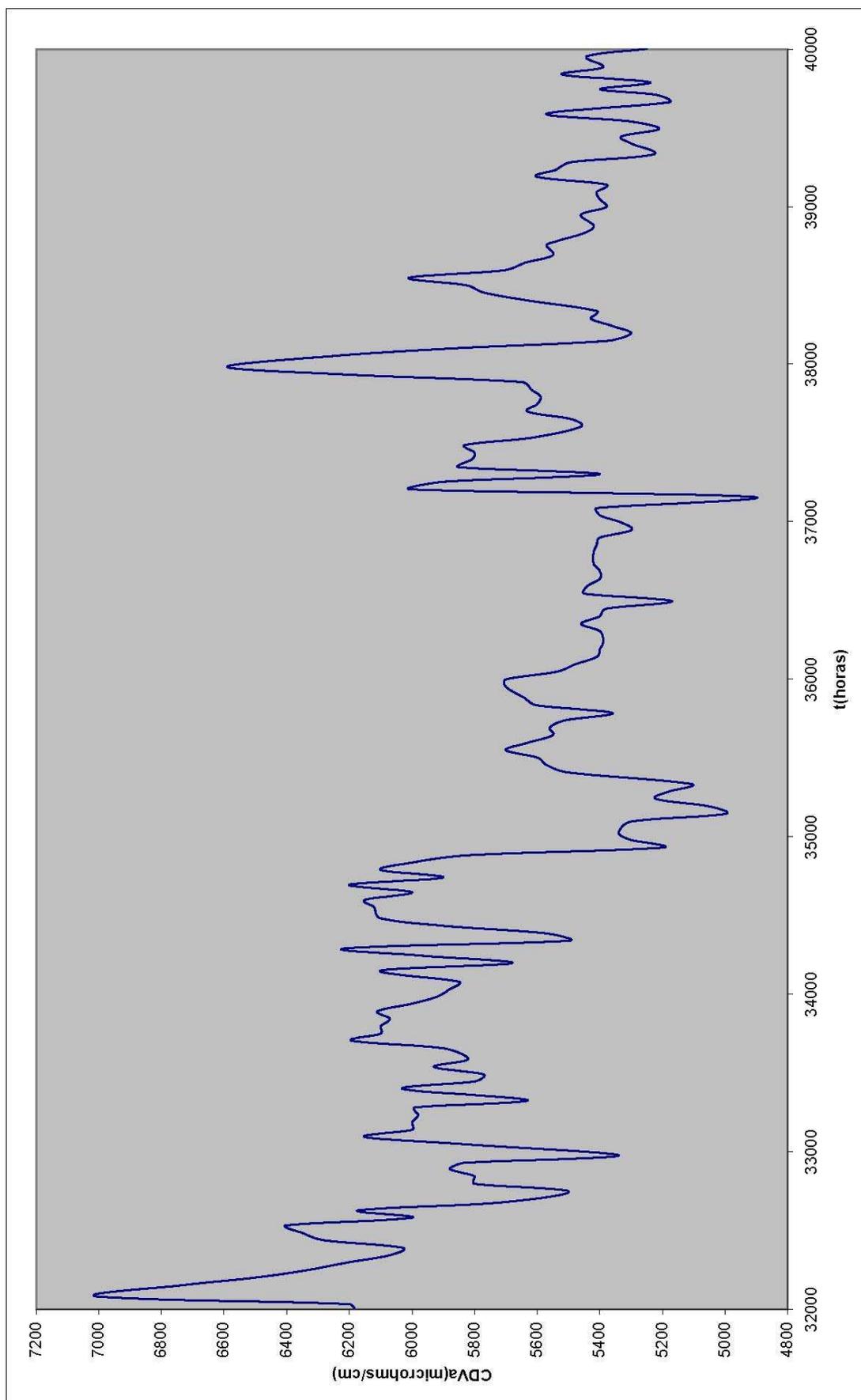


FIGURA F-VII/1: CONDUCTIVIDAD ALIMENTACION (5/5)

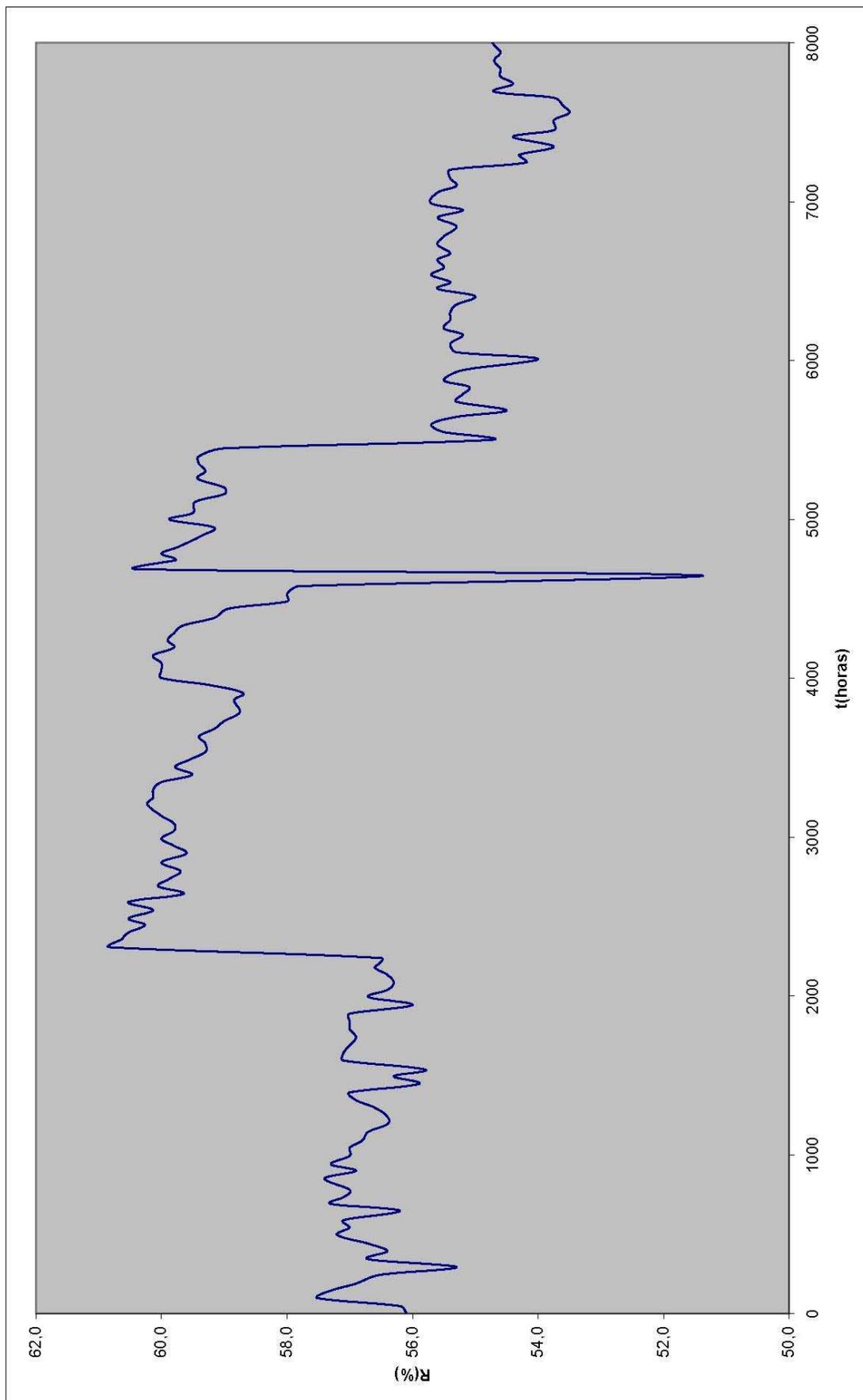


FIGURA F-VII/2: RECUPERACION (1/5)

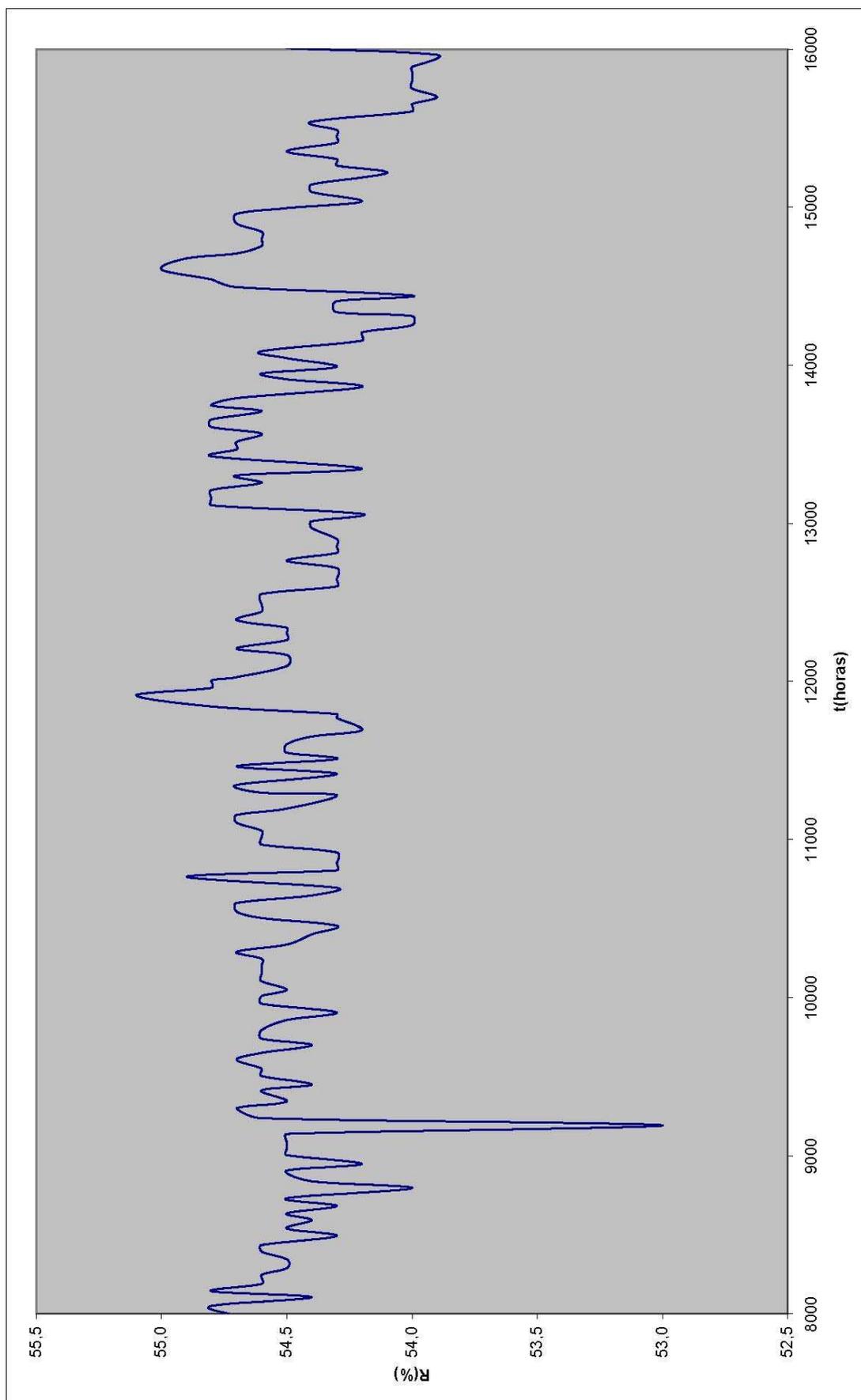


FIGURA F-VII/2: RECUPERACION (2/5)

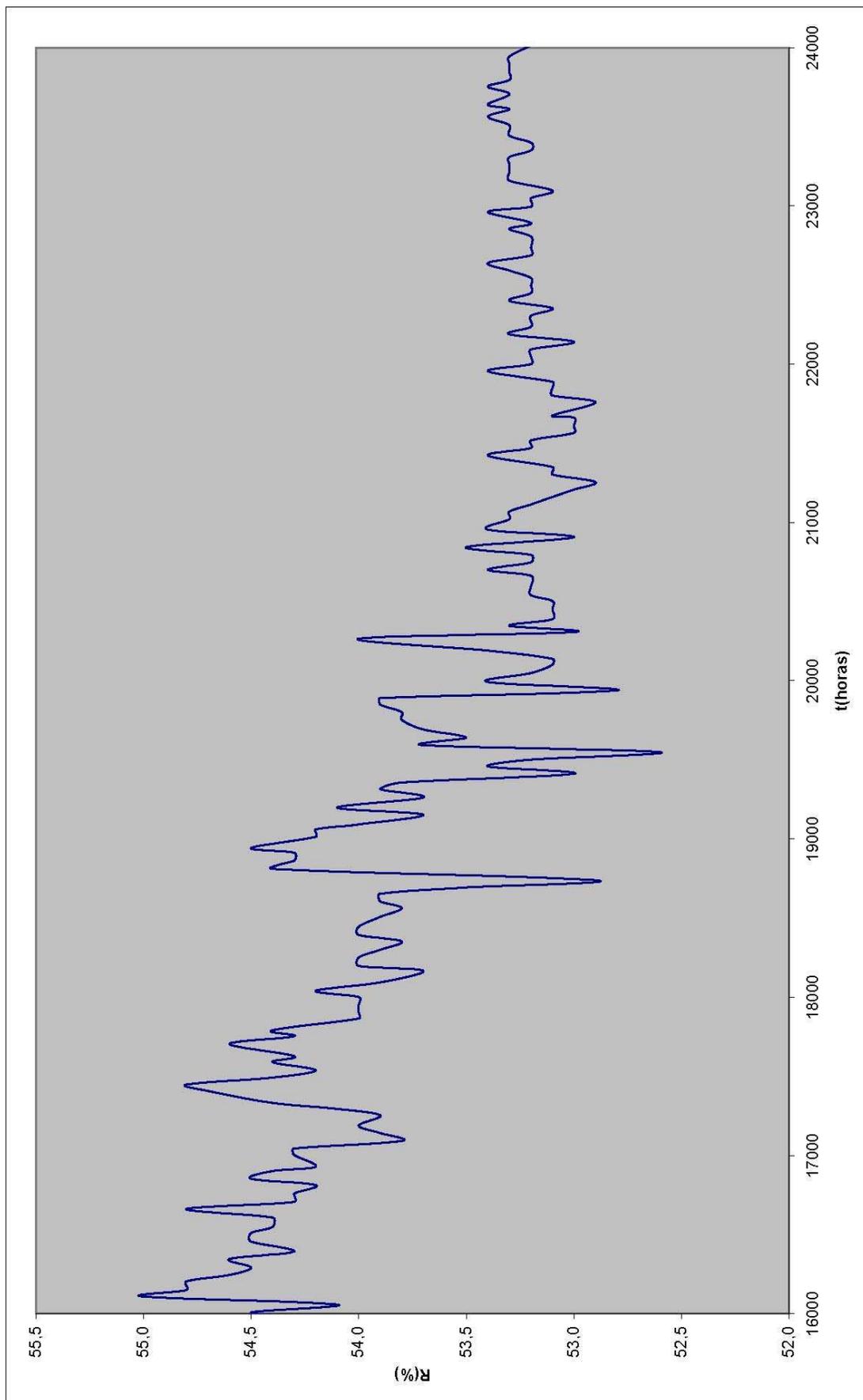


FIGURA F-VII/2: RECUPERACION (3/5)

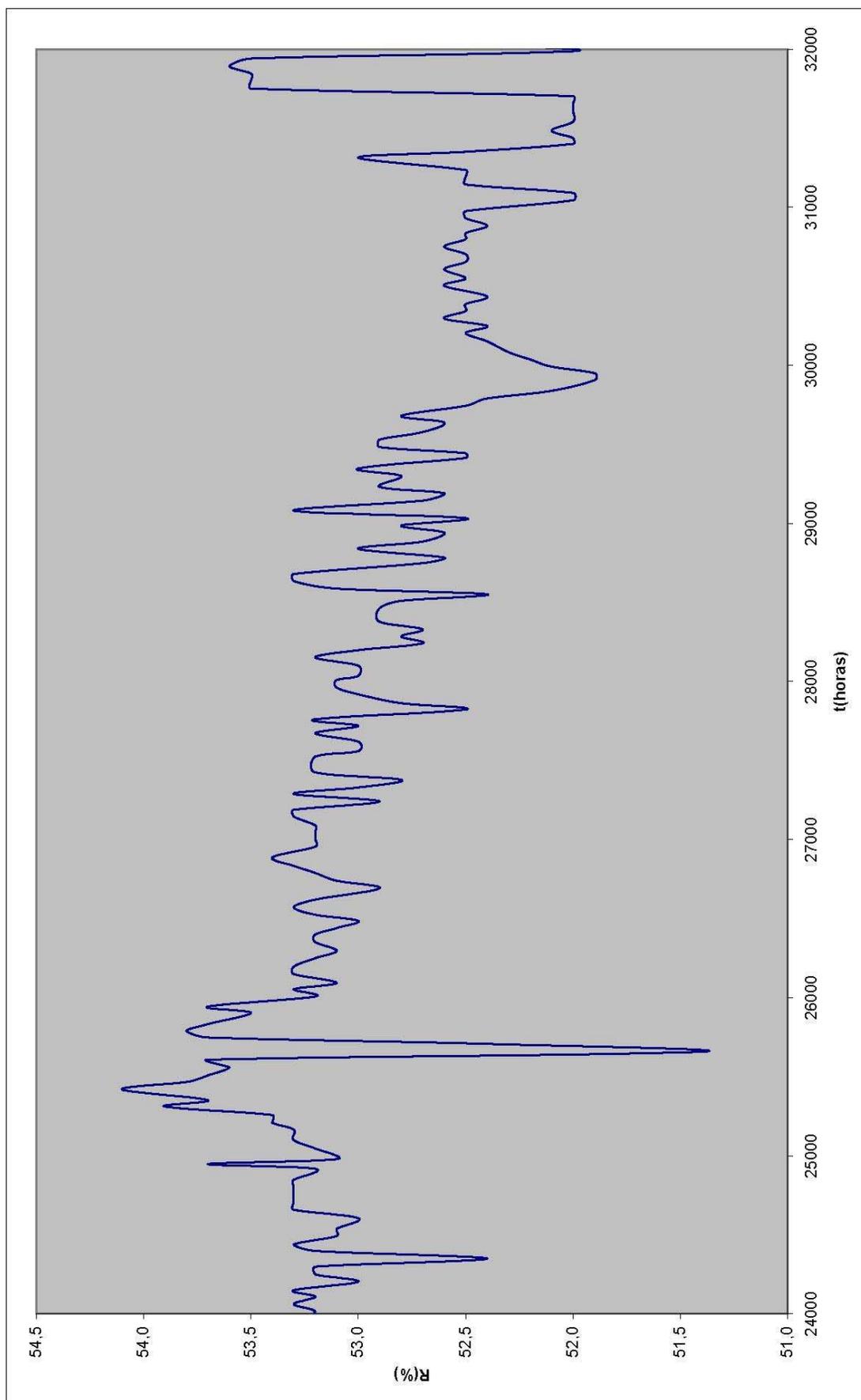


FIGURA F-VII/2: RECUPERACION (4/5)

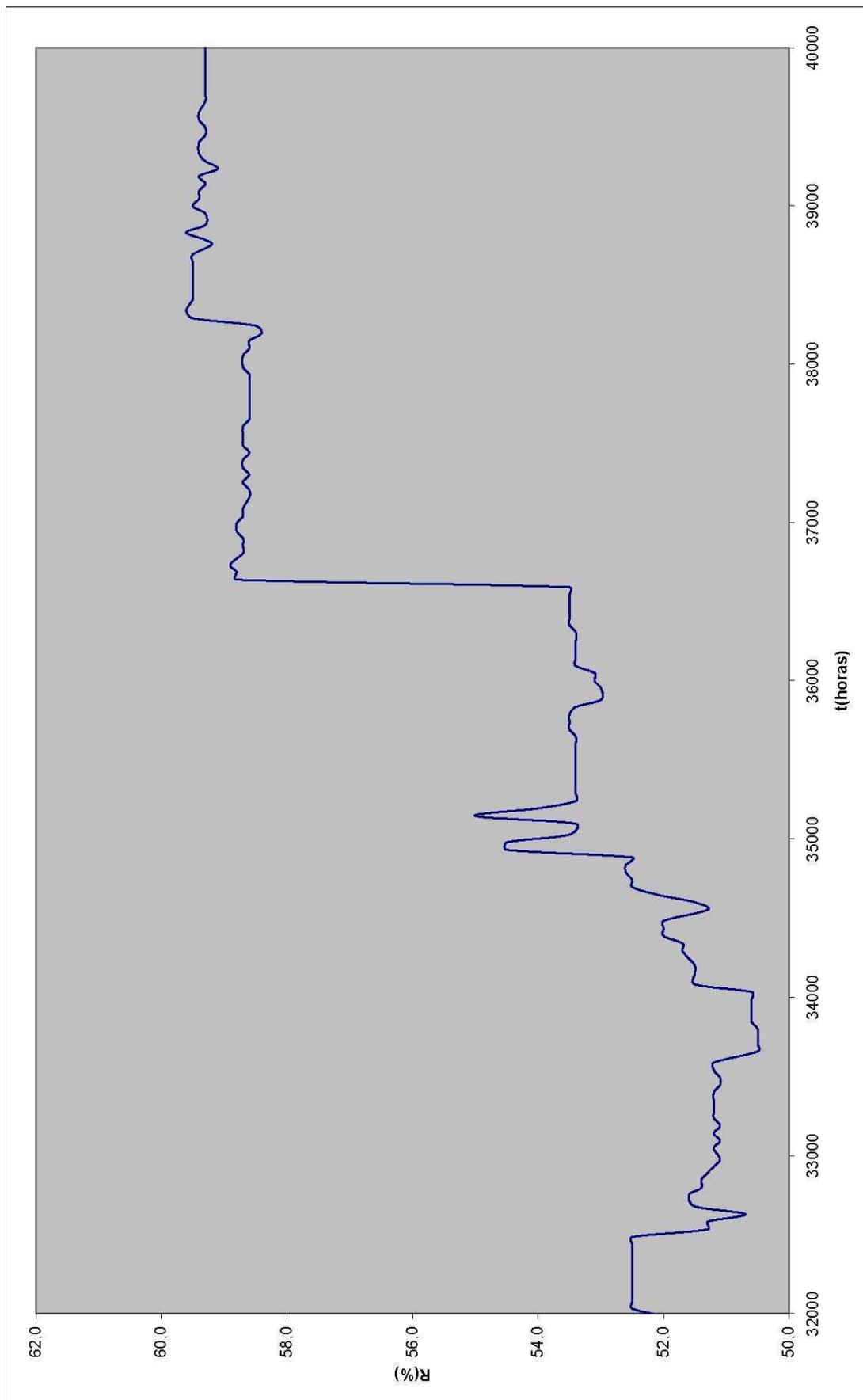


FIGURA F-VII/2: RECUPERACION (5/5)

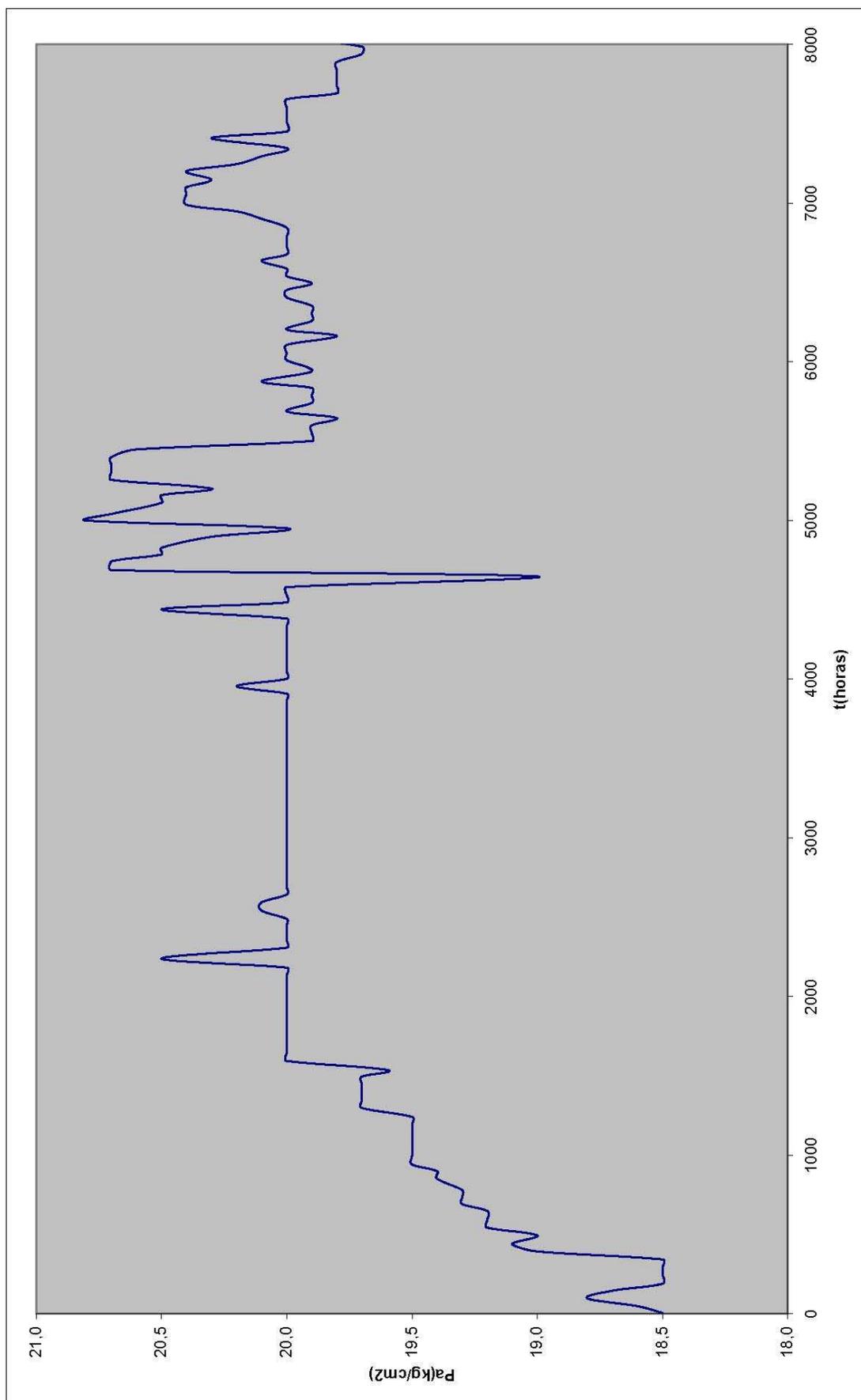


FIGURA F-VII/3: PRESION DE ALIMENTACION (1/5)

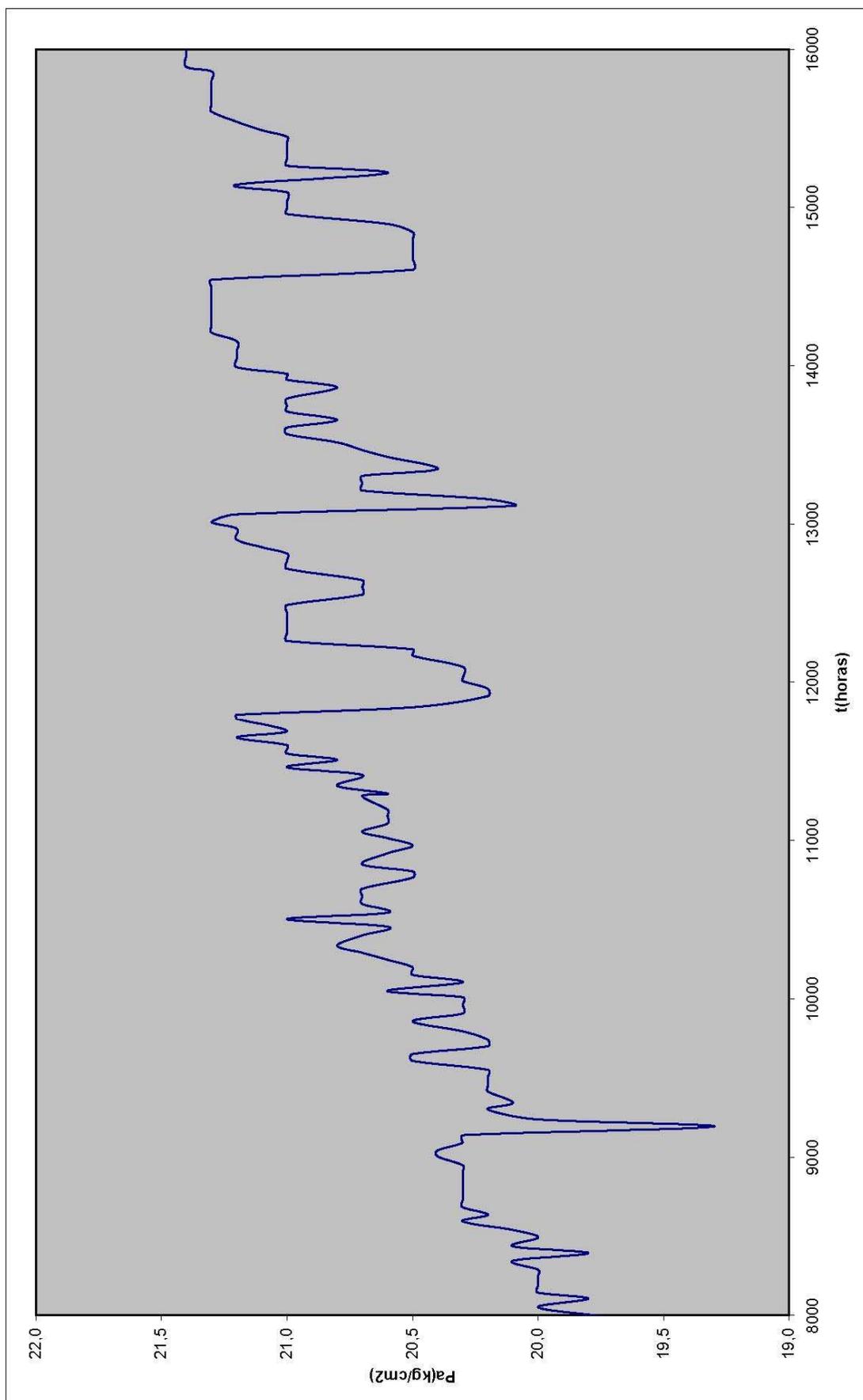


FIGURA F-VII/3: PRESION DE ALIMENTACION (2/5)

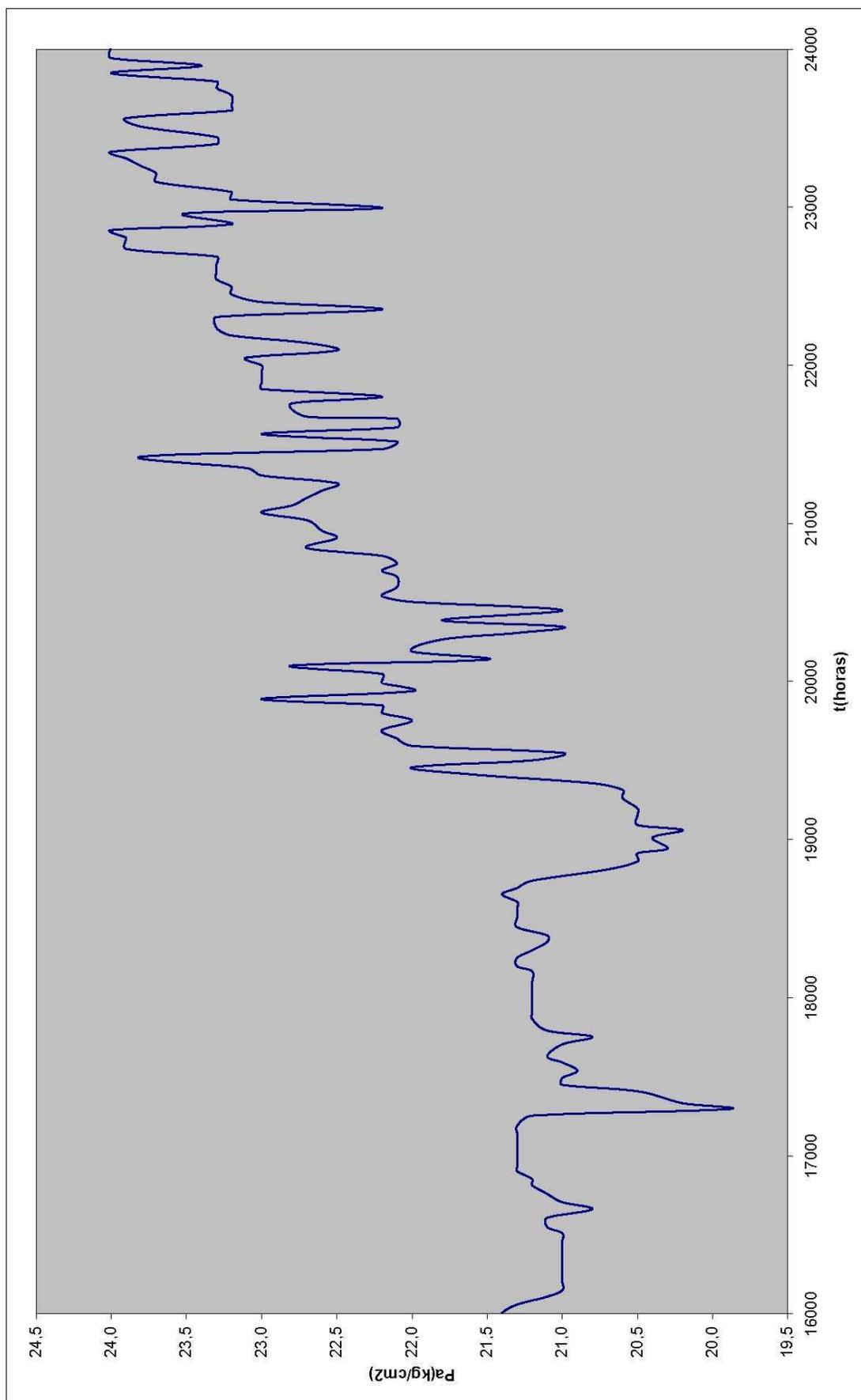


FIGURA F-VII/3: PRESION DE ALIMENTACION (3/5)

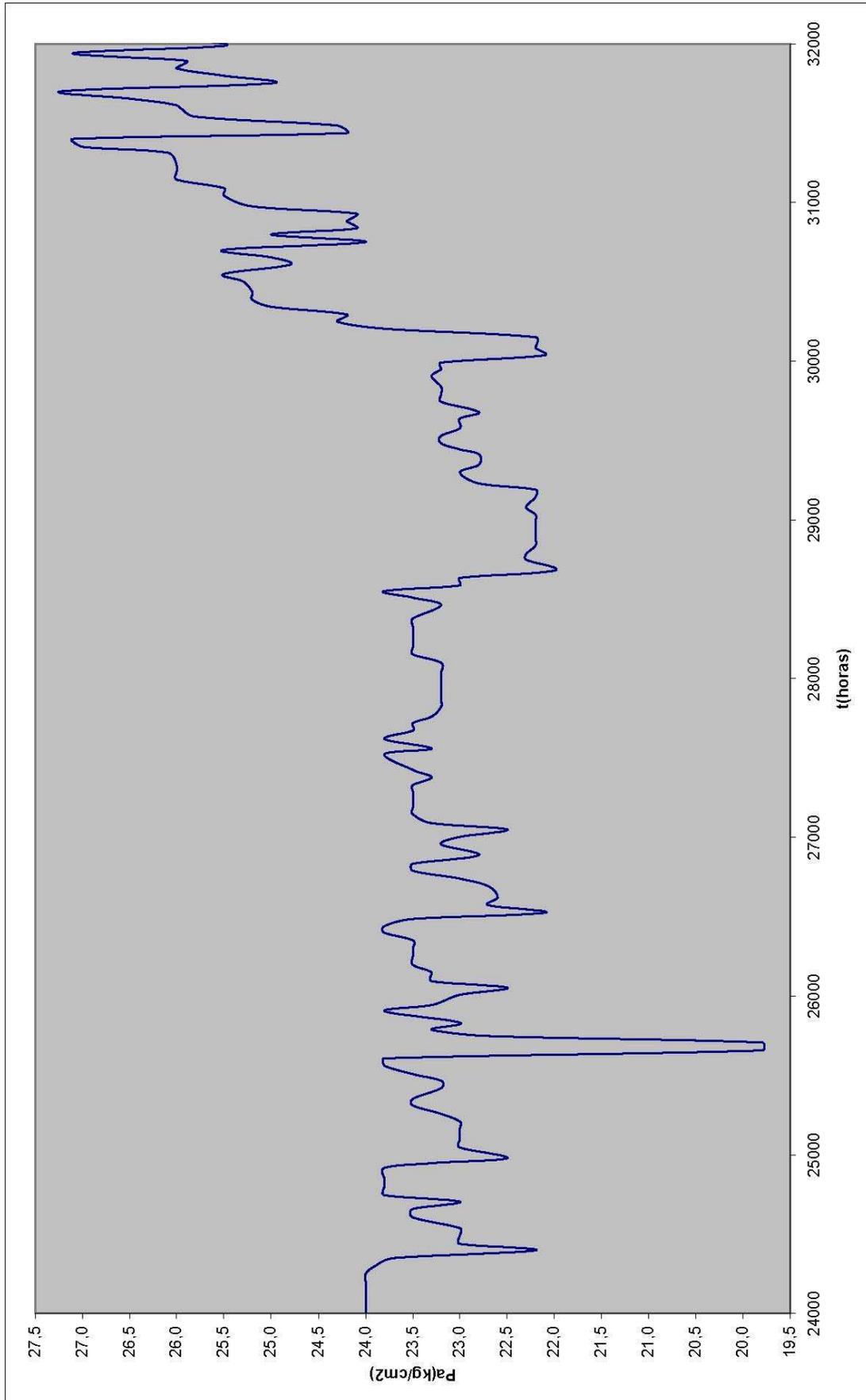


FIGURA F-VII/3: PRESION DE ALIMENTACION (4/5)

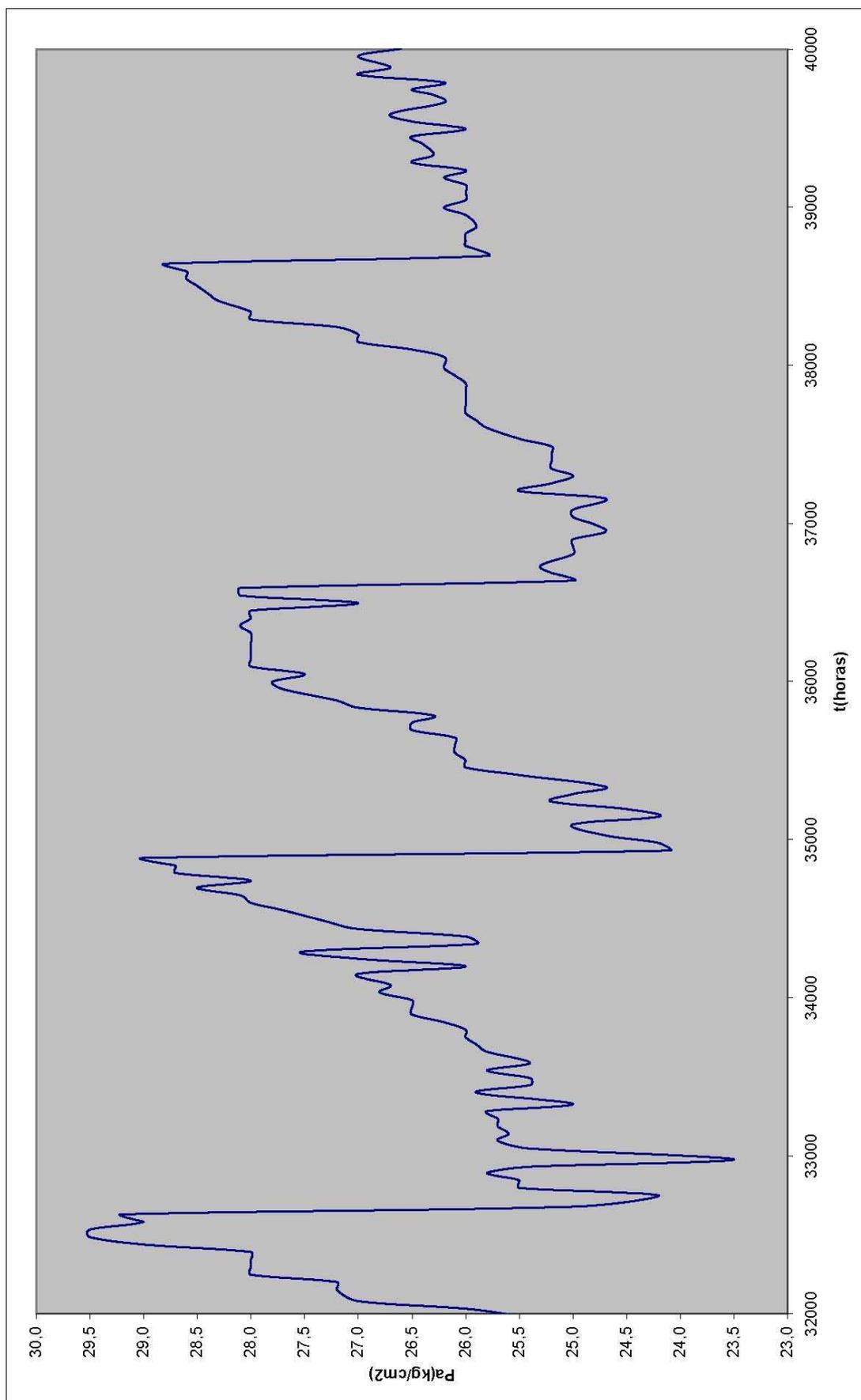


FIGURA F-VII/3: PRESION DE ALIMENTACION (5/5)

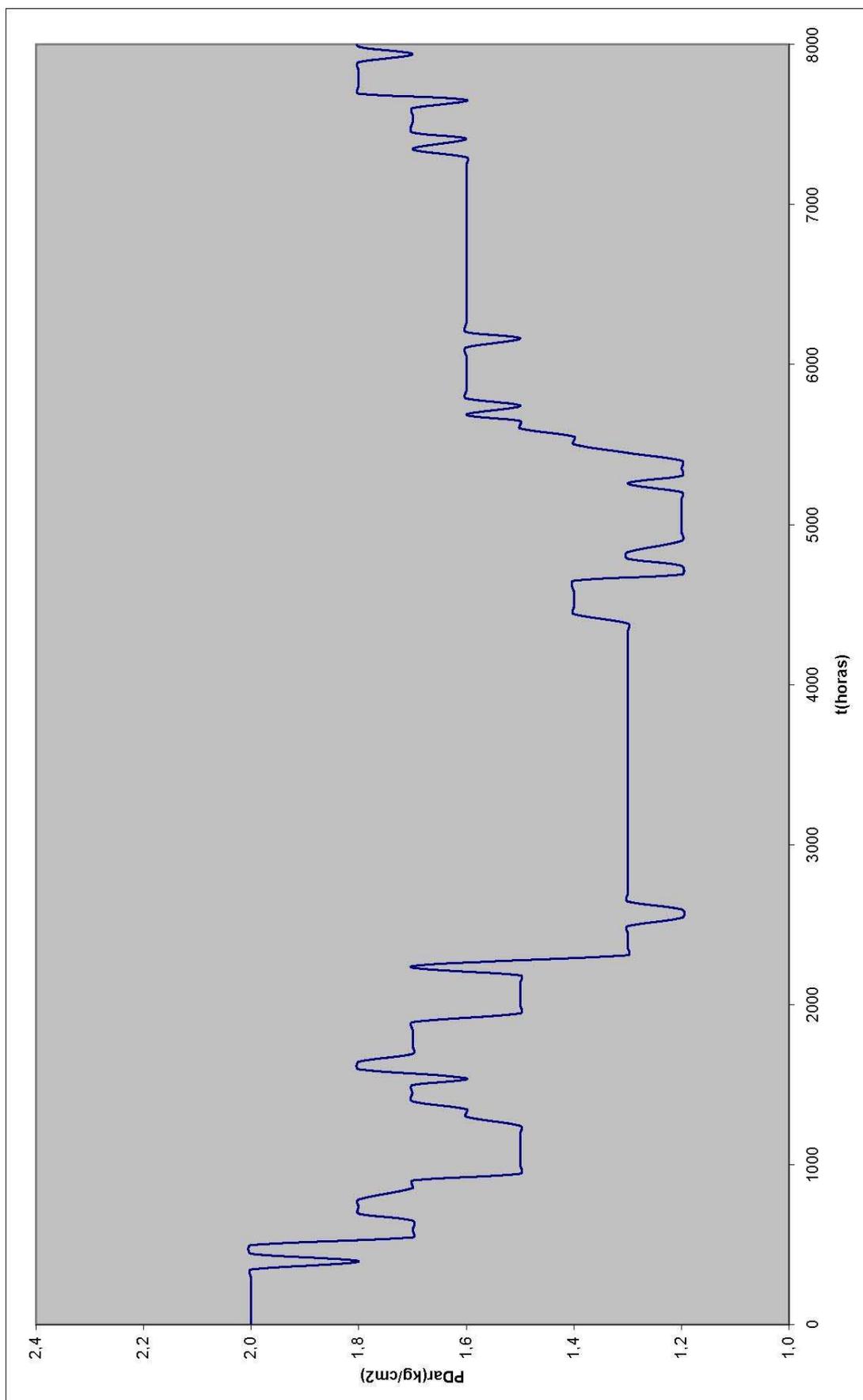


FIGURA F-VII/4: PRESION DIFERENCIAL ALIMENTACION-RECHAZO (1/5)

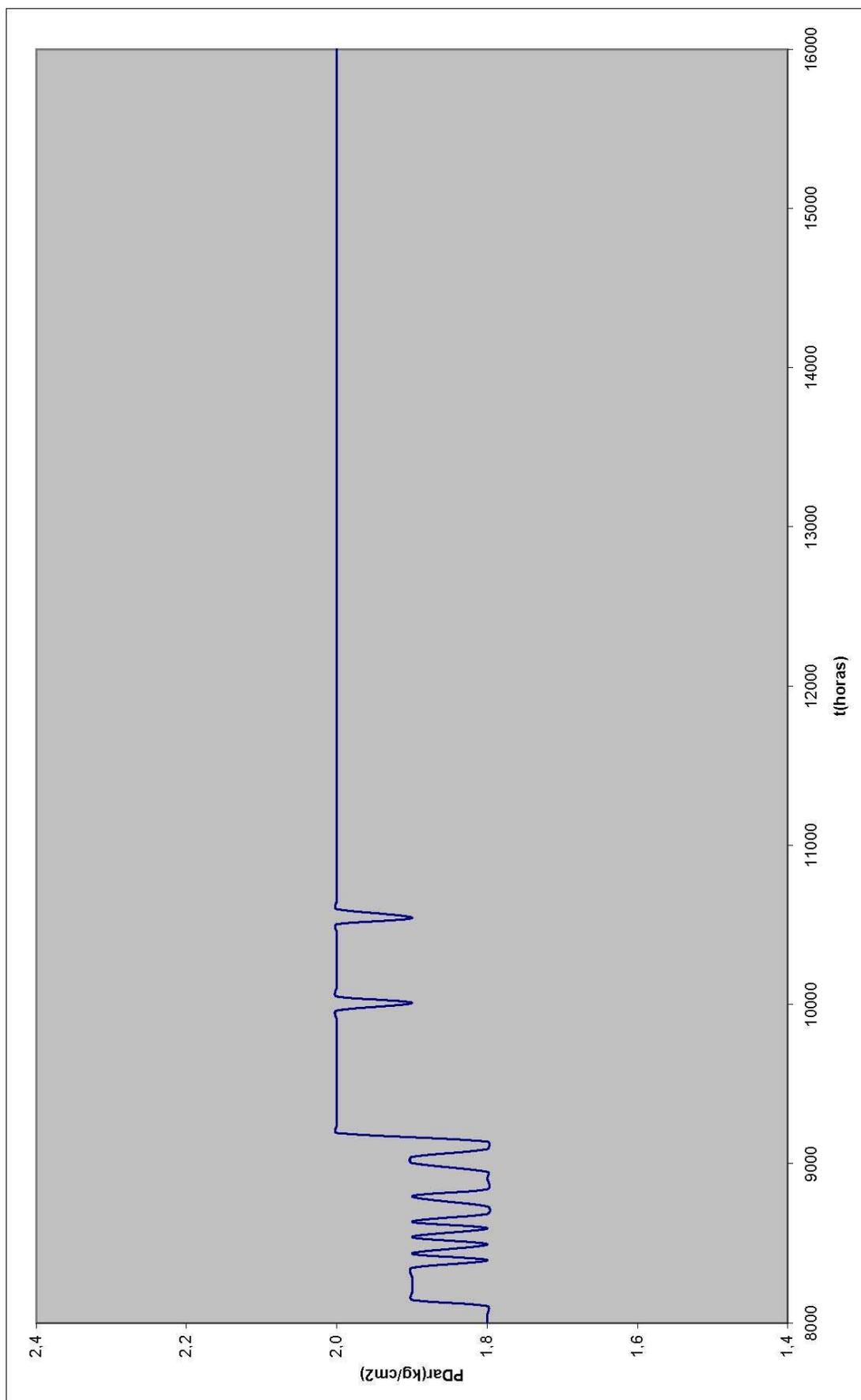


FIGURA F-VII/4: PRESION DIFERENCIAL ALIMENTACION-RECHAZO (2/5)

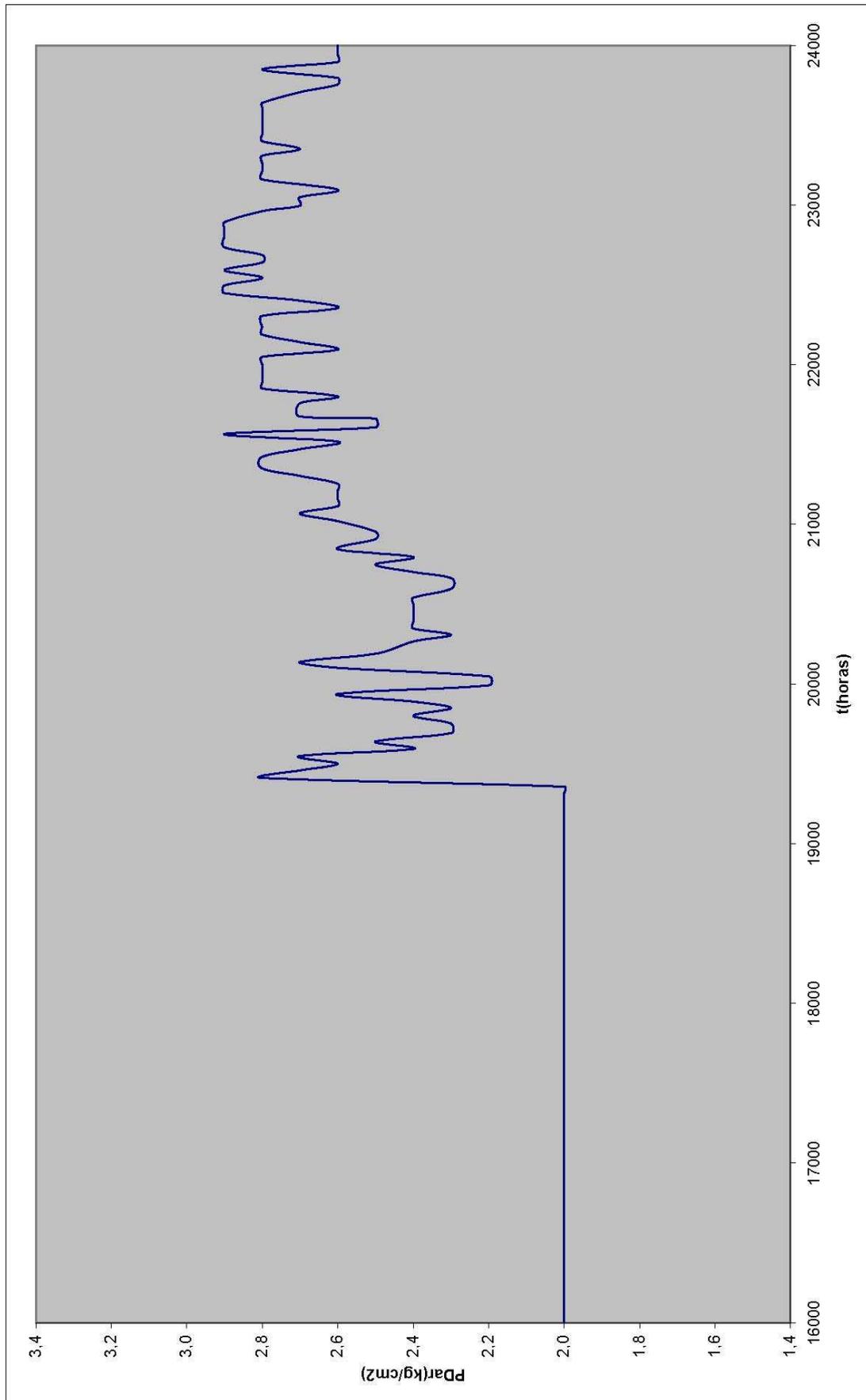


FIGURA F-VII/4: PRESION DIFERENCIAL ALIMENTACION-RECHAZO (3/5)

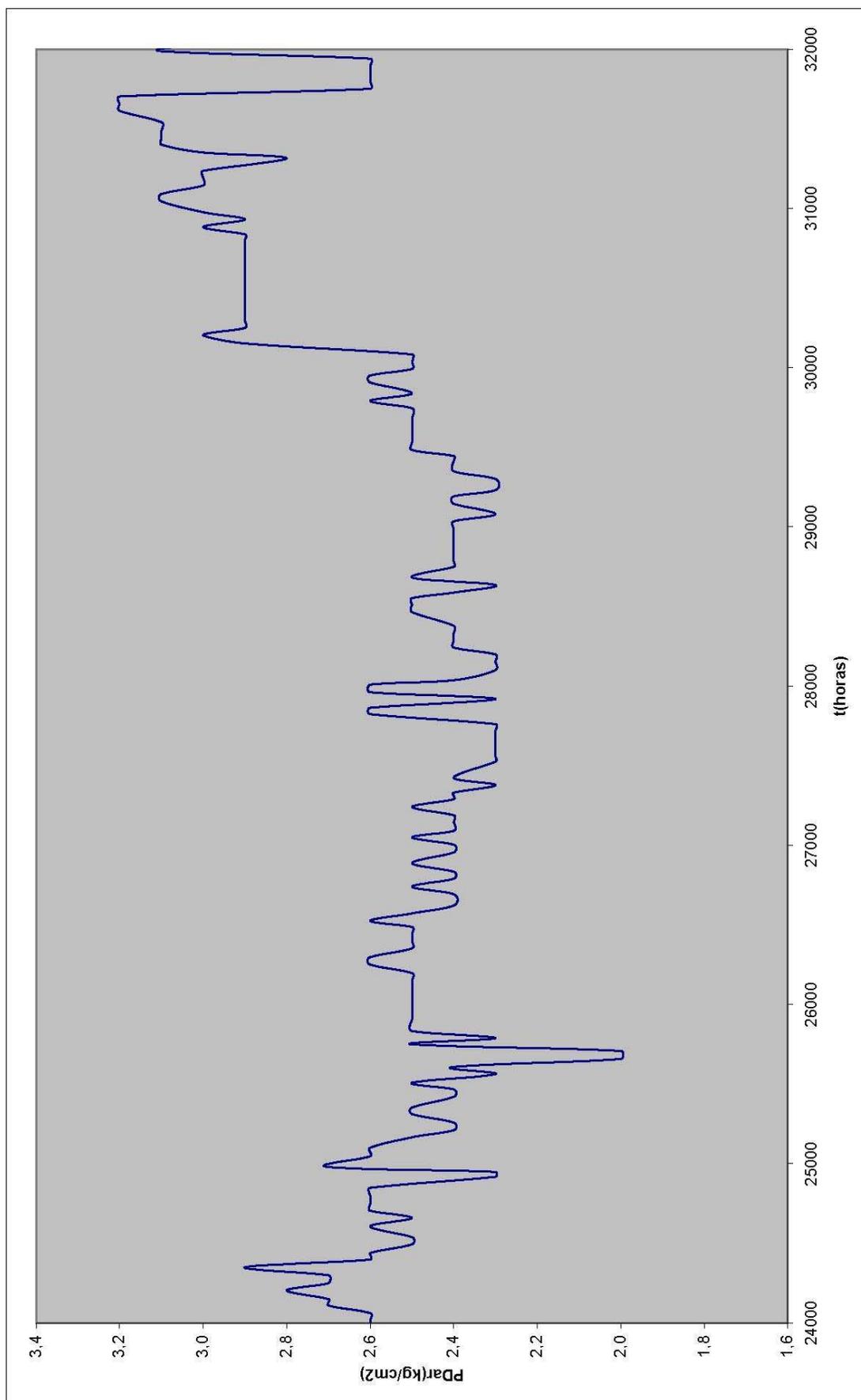


FIGURA F-VII/4: PRESION DIFERENCIAL ALIMENTACION-RECHAZO (4/5)

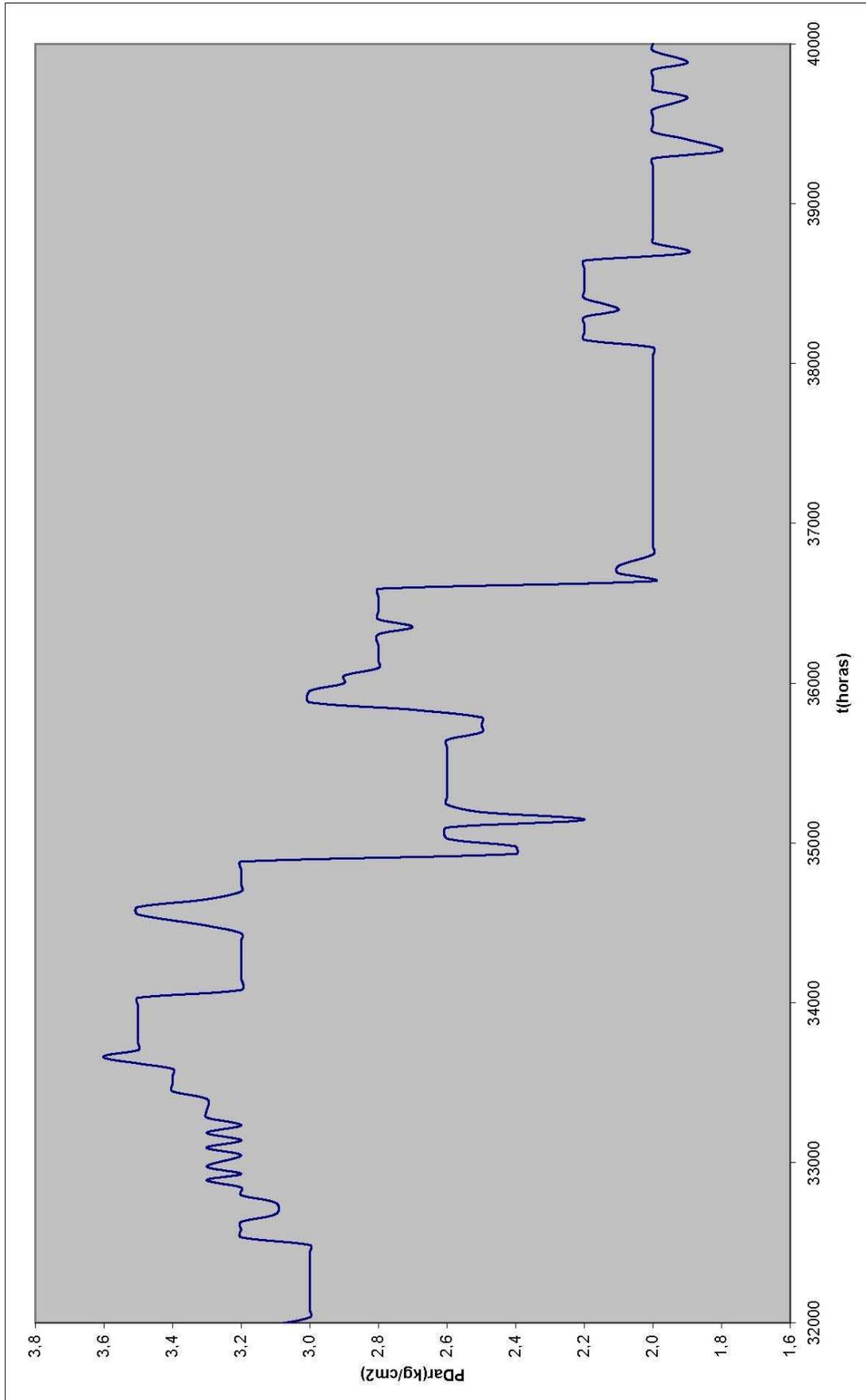


FIGURA F-VII/4: PRESION DIFERENCIAL ALIMENTACION-RECHAZO (5/5)

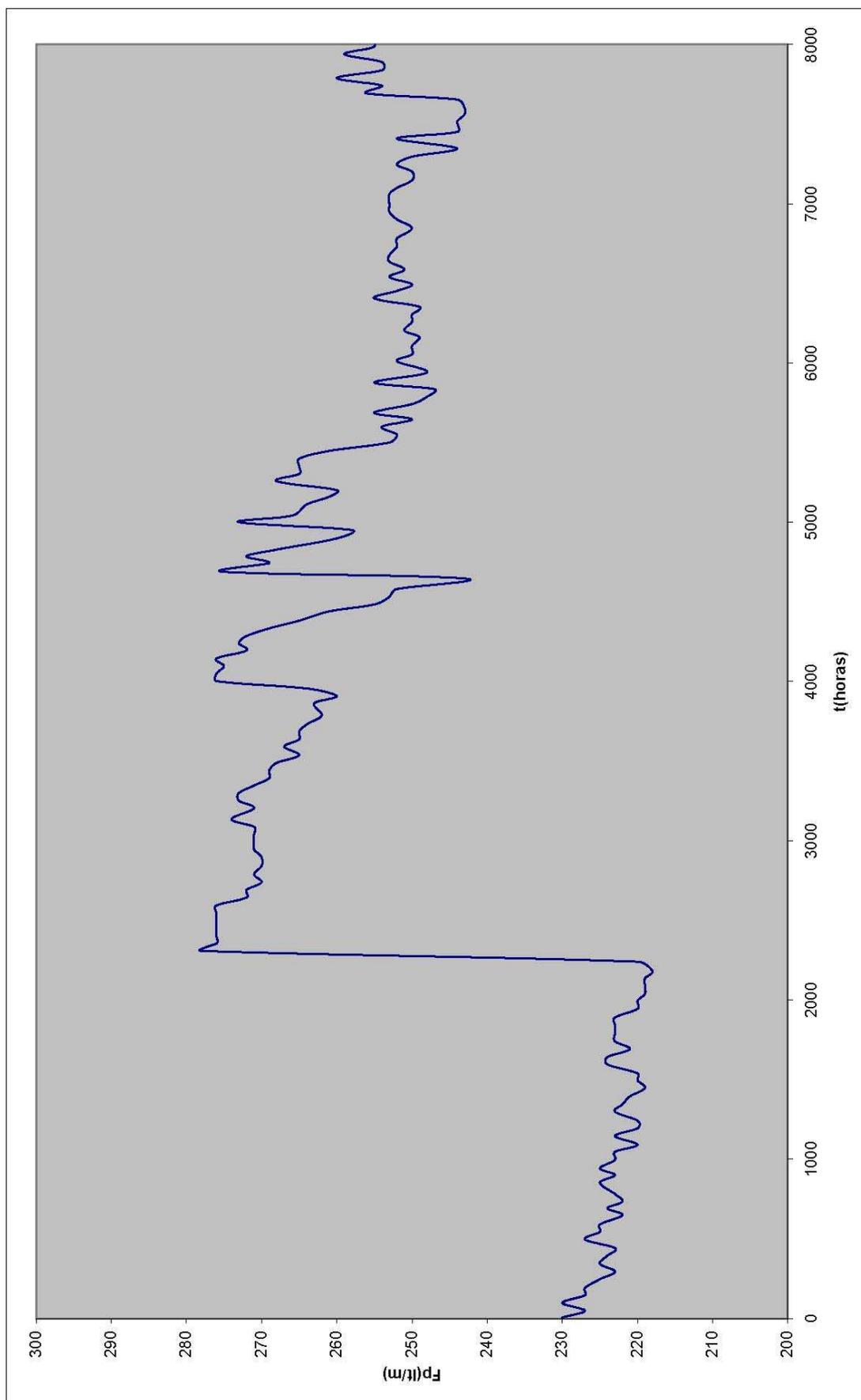


FIGURA F-VII/5: PRODUCCION (1/5)

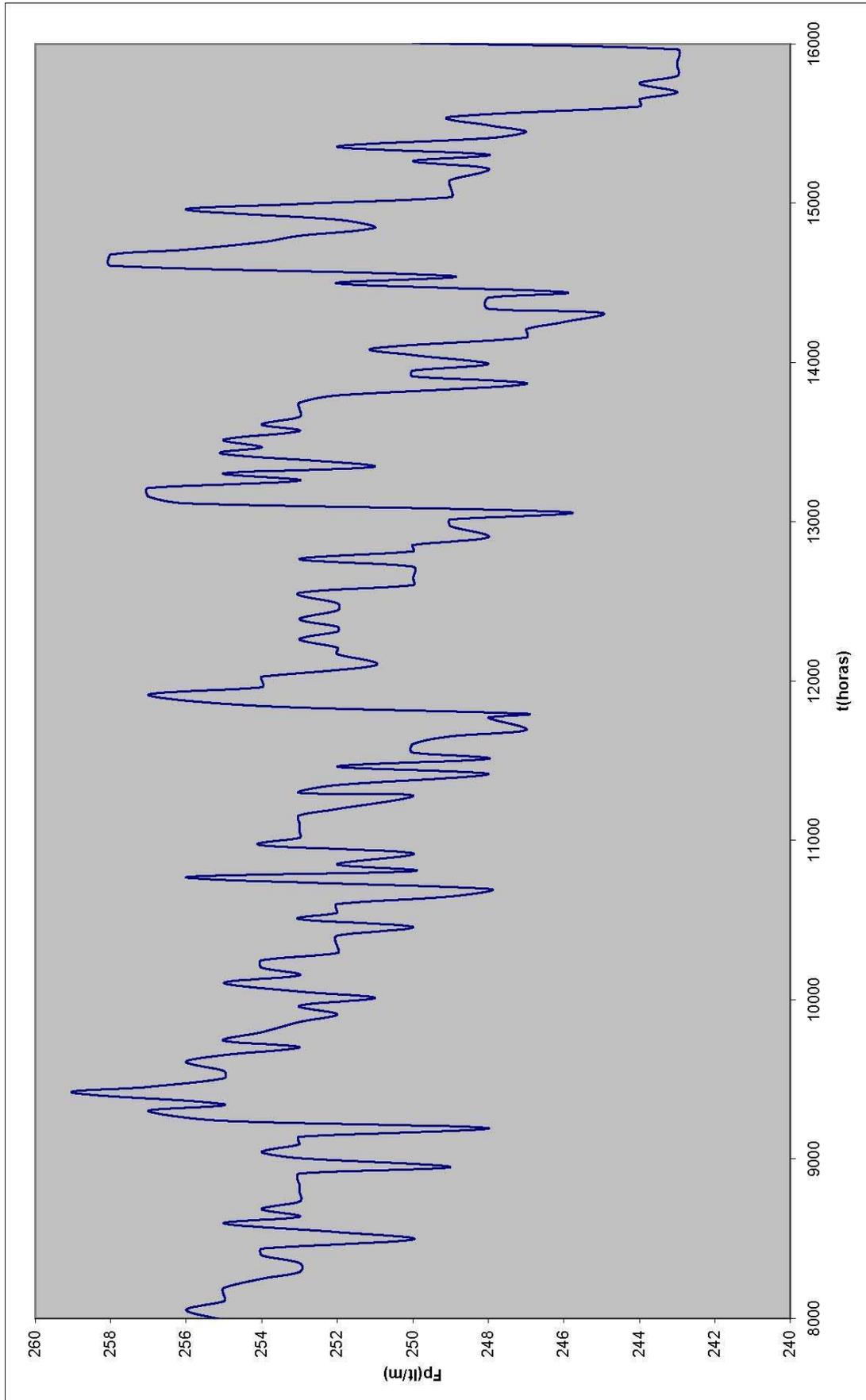


FIGURA F-VII/5: PRODUCCION (2/5)

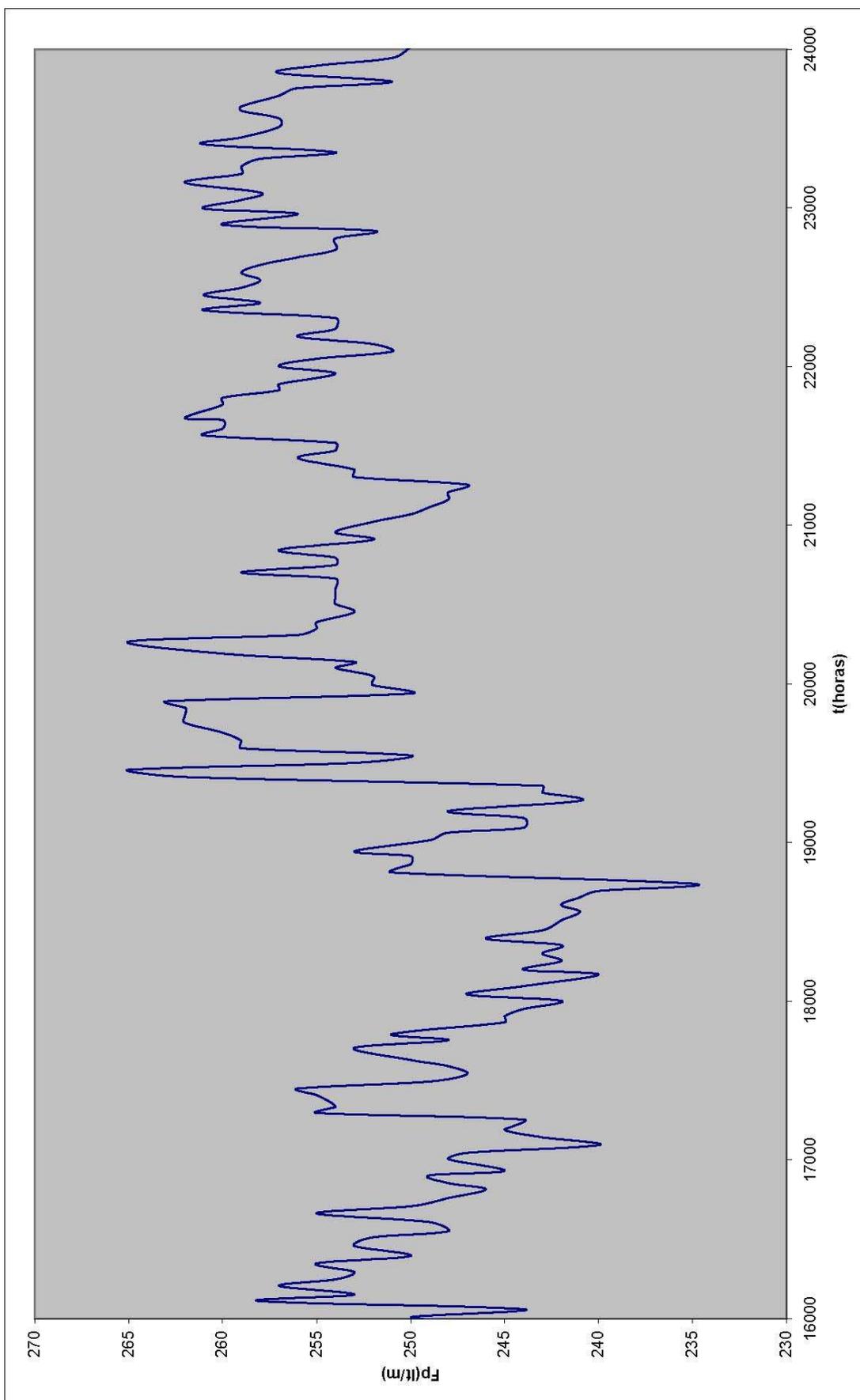


FIGURA F-VII/5: PRODUCCION (3/5)

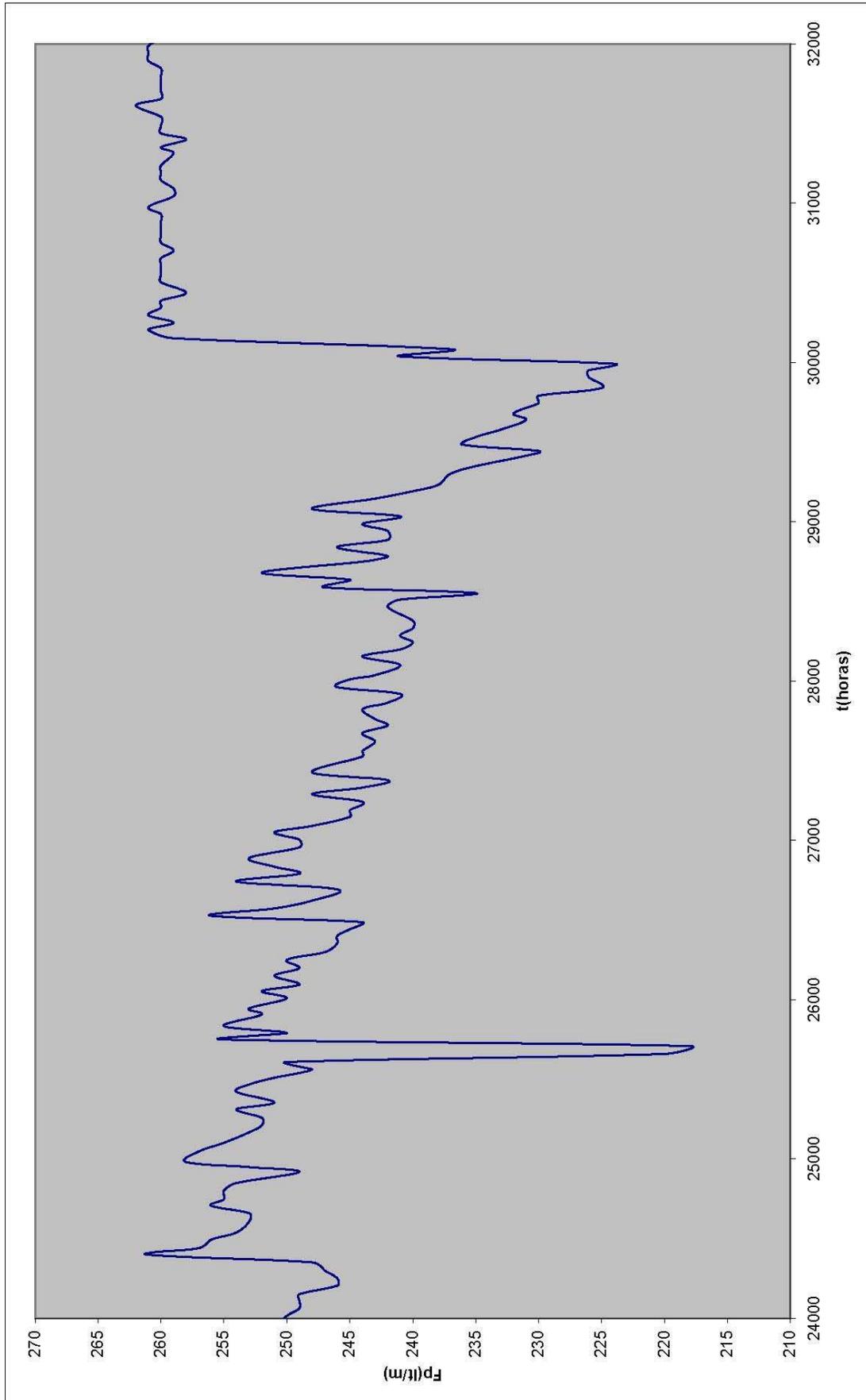


FIGURA F-VII/5: PRODUCCION (4/5)

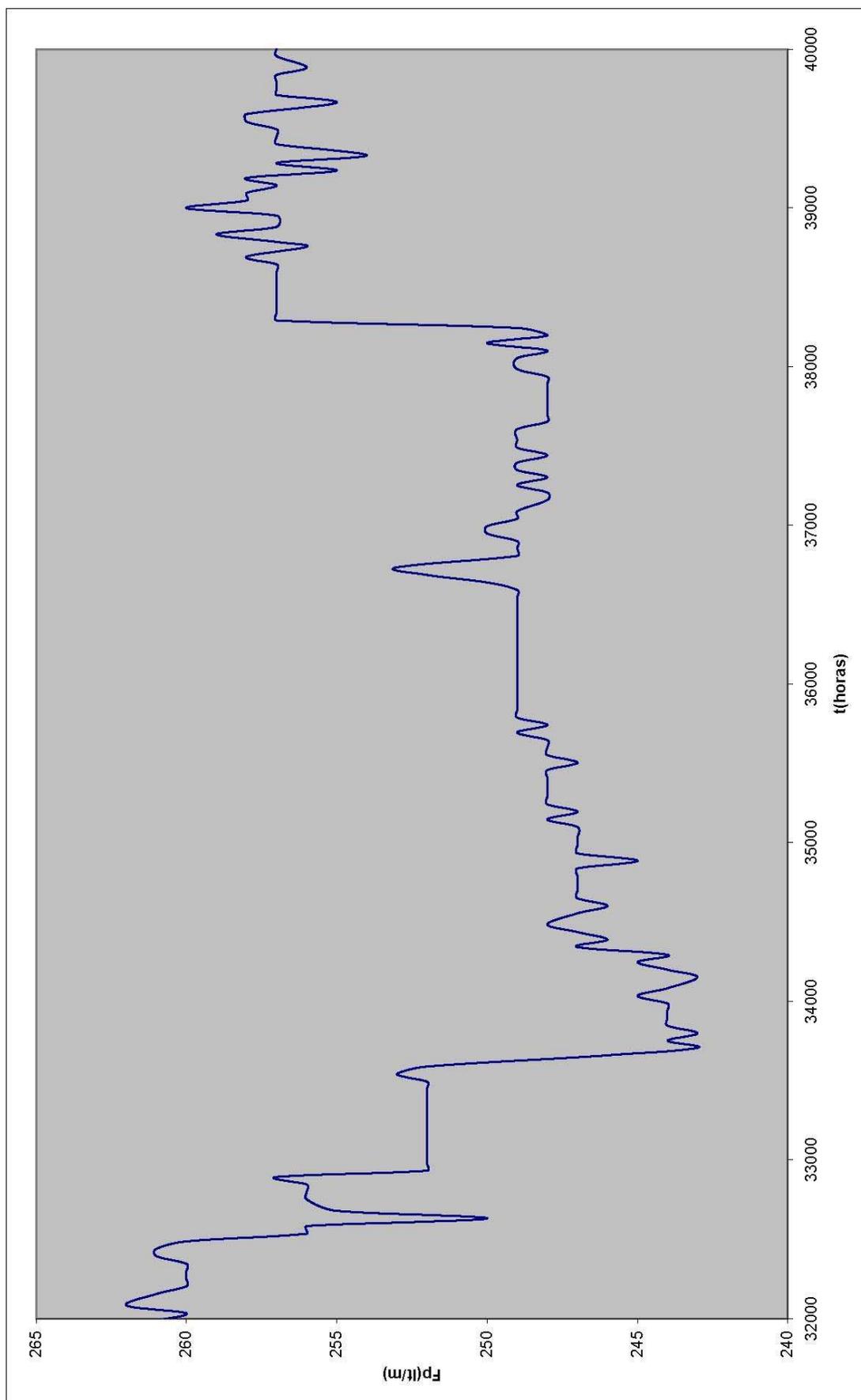


FIGURA F-VII/5: PRODUCCION (5/5)

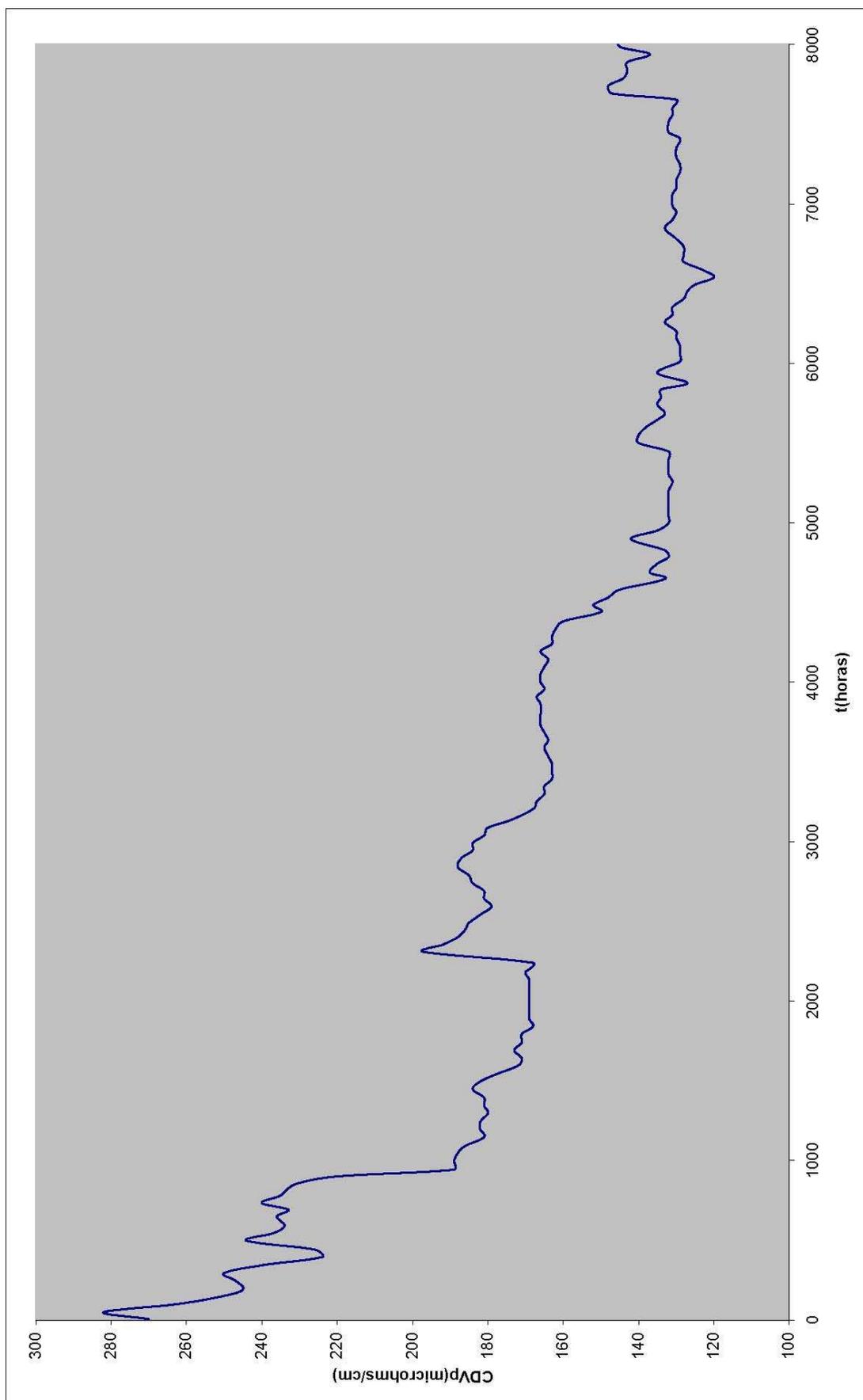


FIGURA F-VIII/6: CONDUCTIVIDAD PRODUCTO (1/5)

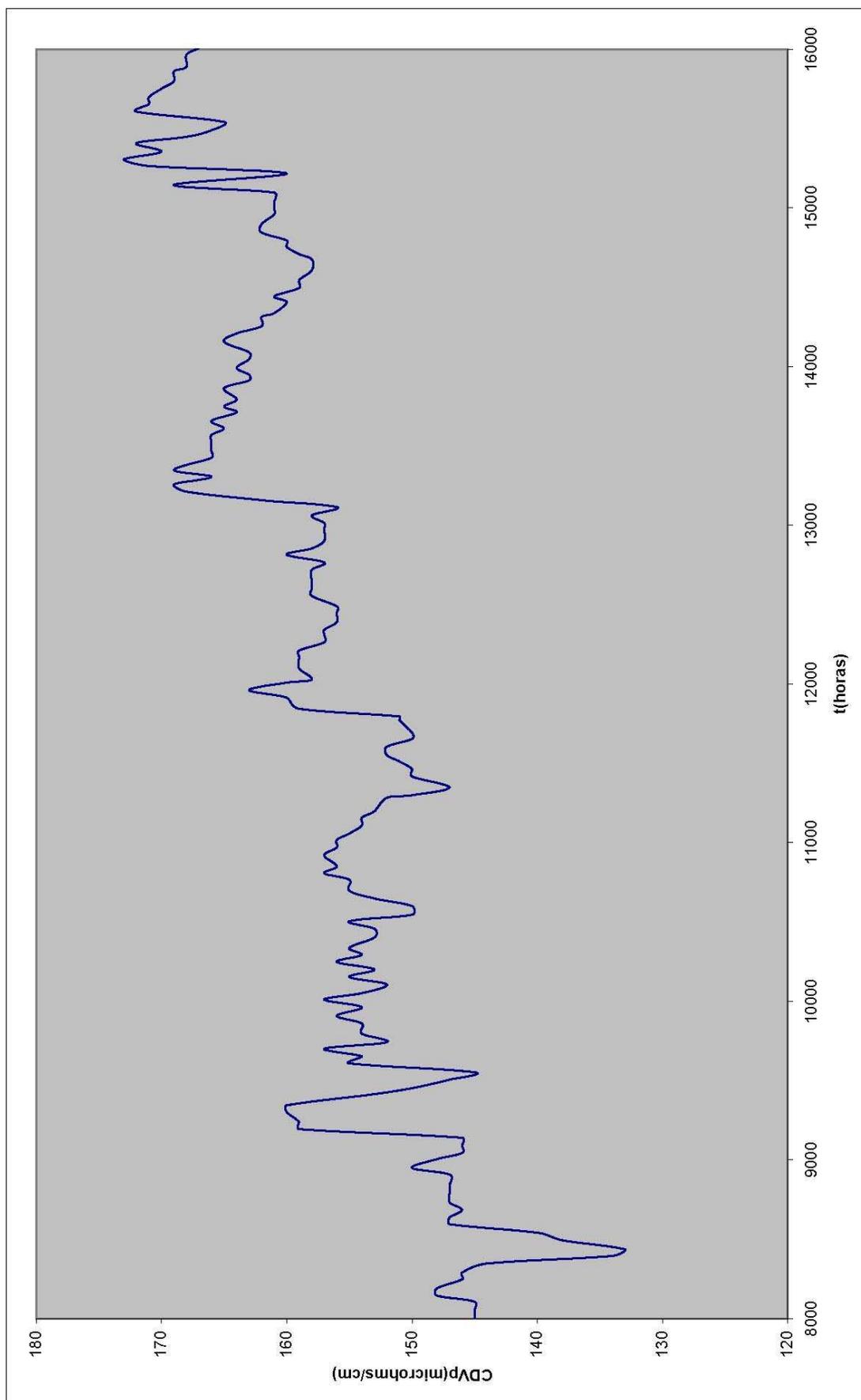


FIGURA F-VII/6: CONDUCTIVIDAD PRODUCTO (2/5)

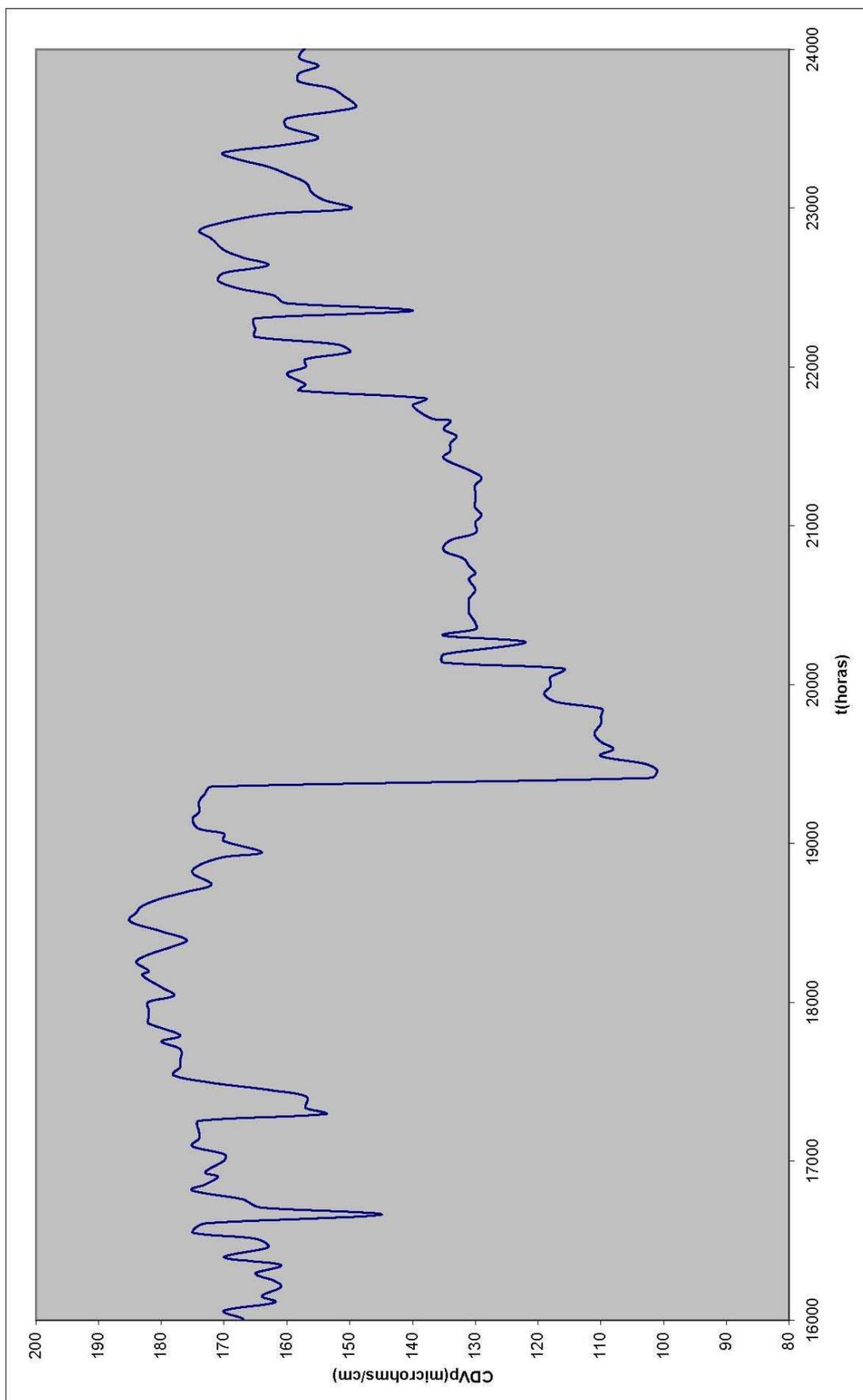


FIGURA F-VII/6: CONDUCTIVIDAD PRODUCTO (3/5)

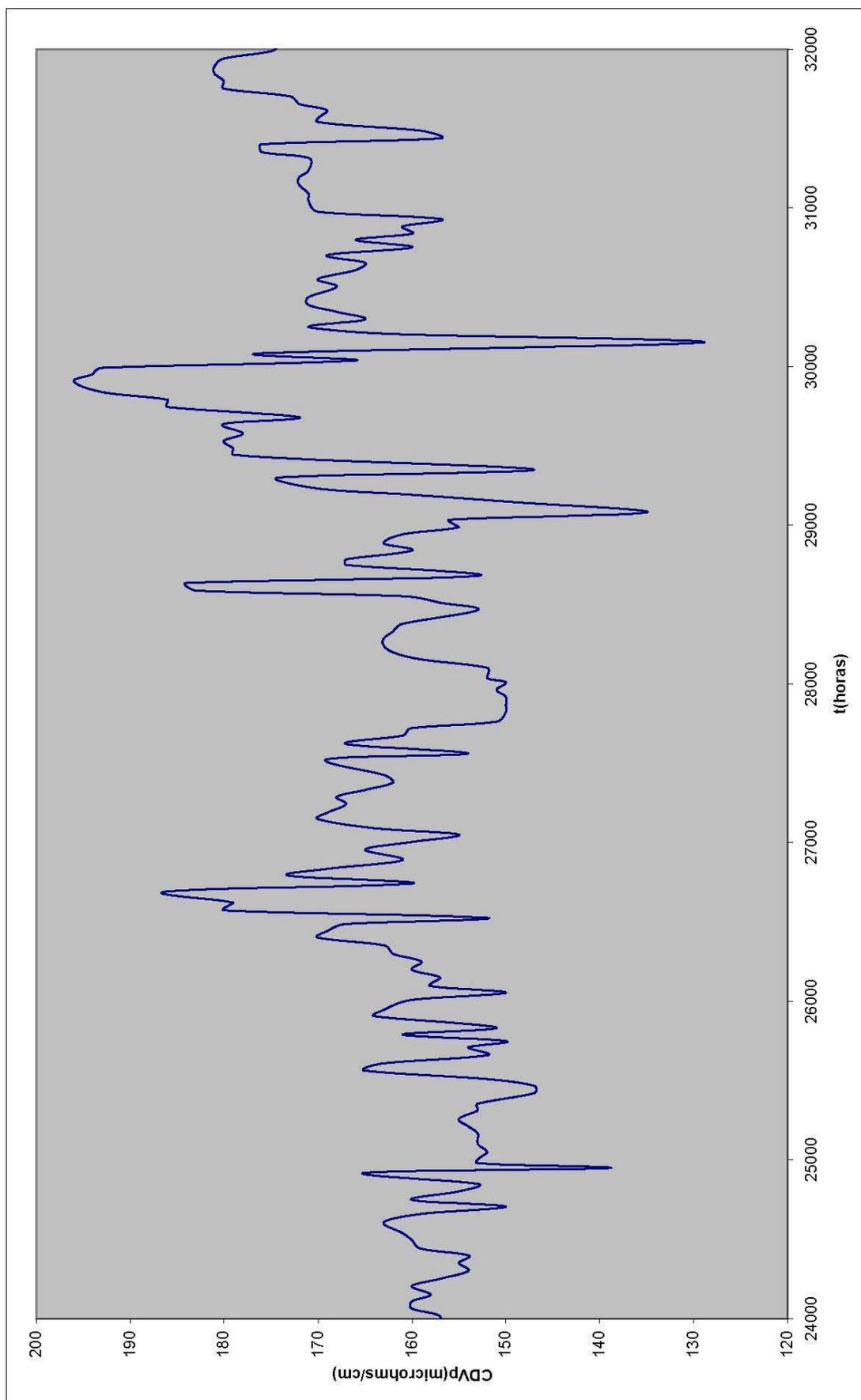


FIGURA F-VII/6: CONDUCTIVIDAD PRODUCTO (4/5)

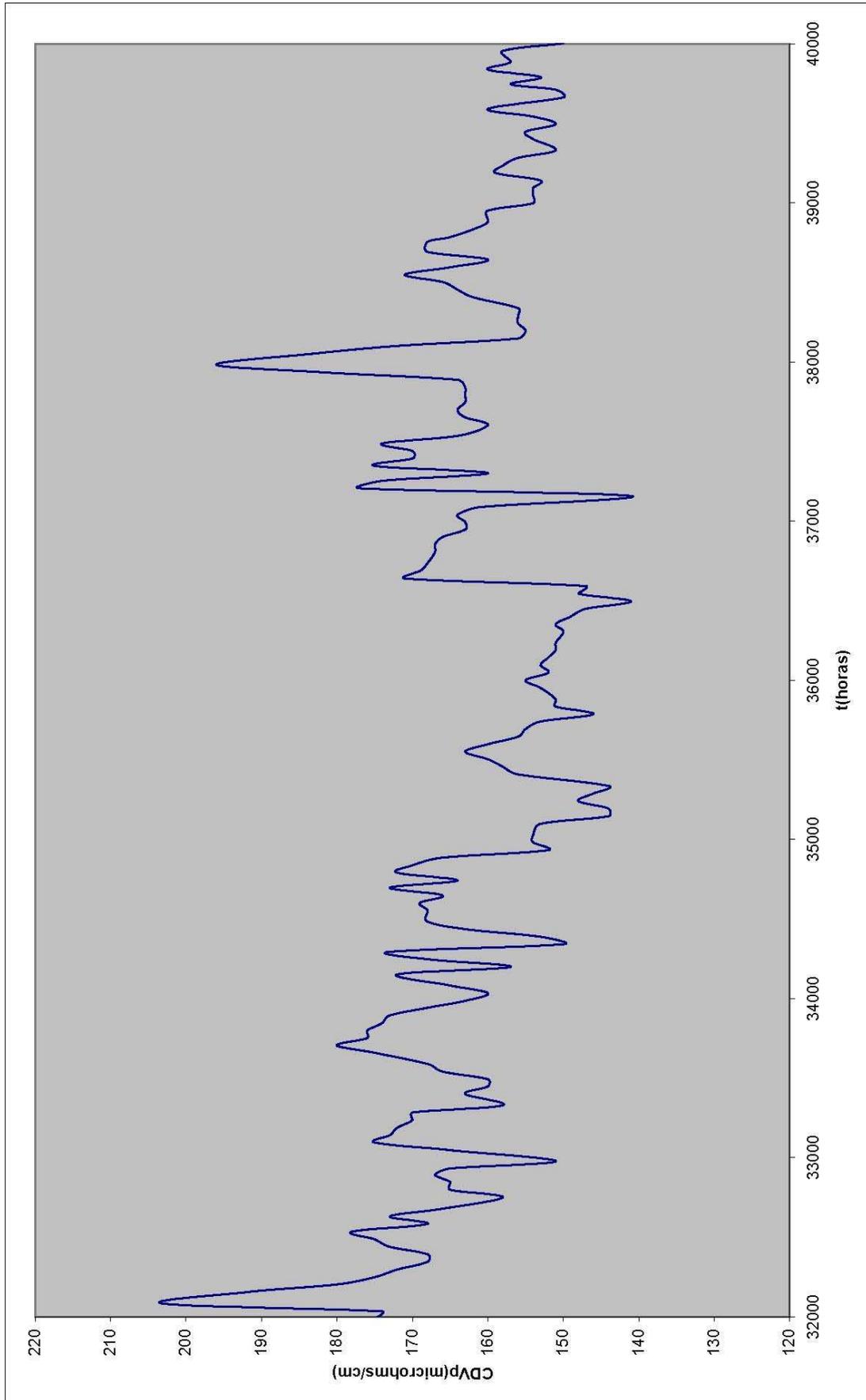


FIGURA F-VIII/6: CONDUCTIVIDAD PRODUCTO (5/5)

NOTA: Para simbología y referencias, ver Capítulo VII.

