

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y  
MANUFACTURERA**

***INFORME DE SUFICIENCIA***

***PARA LA OBTENCION DEL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO QUIMICO***

***“EVALUACION DEL TRATAMIENTO DE AGUA POR  
OSMOSIS INVERSA PARA UNA PLANTA DE  
ESTABILIZANTES PARA PVC”***

**PRESENTADO POR:**

**EDUARDO MARIO ARAUCO LINARES**

**PROMOCION 1992-1**

**AGOSTO DE 2002**

## **DEDICATORIA**

*A mi padre, don José Arauco Conde, de quien se siente profundamente su ausencia; y mi madre Blanca Linares de Arauco, personas que con su indesmayable esfuerzo, lograron formarme humana y profesionalmente.*

*A mi hermana Carmen, ejemplo de lucha, y mi hermano José, mi brazo derecho; con quienes cuento incondicionalmente.*

*Finalmente, a los motivos mas grandes de mi vida: mi esposa Rebeca quien me acompañó y apoyó desde los inicios de mi carrera universitaria, mi hijo Flavio quien me permite formarme paternalmente, y mi segundo hijo a quien esperamos con gran ansias para completar la dicha de nuestro hogar.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Un agradecimiento muy especial a los ingenieros Omar Aron Acosta, Gerente General de Compañía Química S.A, y Hugo Bazalar Díaz, Gerente de Planta , quienes me permitieron escoger el presente tema en estudio , y ofrecieron su apoyo profesional.*

*Asimismo, mi especial agradecimiento al Ing. Jaime Santillana por sus valiosa ayuda como asesor en la elaboración del presente informe.*

*Finalmente, no puedo dejar de agradecer a todos los profesores del Curso de Actualización de Conocimientos, quienes volcaron toda su experiencia profesional, durante el desarrollo del curso.*

## ***RESUMEN***

El presente informe tiene por objetivo mostrar las características y bondades de un sistema de tratamiento de agua por ósmosis inversa, en una empresa peruana dedicada a la producción de Plastificantes y Estabilizantes para PVC : *Compañía Química S.A.*

Debido a las necesidades de tener un agua de proceso de alta calidad, con un contenido de TDS alrededor a 1 ppm debido a la aplicación de sus productos, es que se plantea la instalación de un sistema de osmosis inversa combinado con un sistema de deionización, en contraste con un sistema convencional de deionización en serie.

En el informe se presenta la parte teórica donde se describe el proceso de ósmosis inversa, las variables que desarrolla, así como los diferentes tipos de membranas y configuraciones típicas que se presentan.

Luego se presenta una descripción de la empresa, las características de la fuente de agua que utiliza y la descripción de las características de la instalación del equipo de ósmosis inversa.

Finalmente se presenta la Evaluación Económica, donde se contraponen los costos de un sistema de deionización en serie, y un sistema combinado de ósmosis inversa y deionización; además de presentar los resultados y ventajas obtenidas con la implementación del equipo de ósmosis inversa en la empresa y los otros tipos de aplicaciones que se pueden dar.

Concluye el informe presentando las conclusiones y recomendaciones del tema en estudio.

## INDICE

<b>Introducción .....</b>	<b>(9)</b>
---------------------------	------------

### **Capítulo 1.**

#### **Sistema de Separación por Membranas : Osmosis Inversa**

1.1. Generalidades.....	(13)
1.2. Descripción del proceso.....	(13)
1.3. Diferencias entre Osmosis y otros procesos de membranas.....	(17)
1.4. Teorías de la Osmosis.....	(18)
1.5. Ecuaciones Fundamentales.....	(19)
1.5.1. Ecuación de flujo de agua.....	(21)
1.5.2. Ecuación del transporte de sales.....	(22)
1.5.3. Rechazo de sales.....	(23)
1.5.4. Paso de sales.....	(24)
1.5.5. Recuperación.....	(24)
1.5.6. Concentración del producto.....	(25)
1.5.7. Concentración del rechazo.....	(25)
1.5.8. Proporción (ratio) de reducción.....	(26)
1.6. Configuraciones de membranas.....	(27)
1.6.1. Membranas de tipo plano.....	(27)
1.6.2. Membranas tubulares.....	(28)
1.6.3. Membranas de fibra hueca.....	(30)
1.6.4. Membranas de arrollamiento en espiral.....	(31)
1.7. Membranas Comerciales.....	(33)
1.8. Diferencias principales entre membranas de fibra hueca y arrollamiento en espiral.....	(35)
1.8.1. Caudal.....	(36)
1.8.2. Presión de funcionamiento.....	(37)
1.8.3. Ensuciamiento.....	(37)
1.8.4. Rechazo de sales.....	(38)

1.8.5. Pérdida de propiedades.....	(38)
1.9. Colocación de las membranas.....	(39)
1.9.1. Etapa.....	(41)
1.9.2. Paso.....	(41)
1.9.3. Estructuras de Producción.....	(42)
1.9.3.1 Simple.....	(42)
1.9.3.2 Etapas de salmuera.....	(43)
1.9.3.3 Etapas de producto.....	(44)

## **Capítulo 2 :**

### **Descripción de la empresa de Estabilizantes para PVC**

2.1 La Empresa.....	(47)
2.2 Línea de productos.....	(49)
2.2.1 Estabilizantes .....	(49)
2.2.2 Oxidos.....	(50)
2.2.3 Plastificantes.....	(51)
2.2.4 Secantes.....	(52)
2.2.5 Otros aditivos.....	(52)

## **Capítulo 3 :**

### **Fuente de agua y usos**

3.1 Agua subterránea.....	(54)
3.2 Características del agua subterránea.....	(56)
3.3 Usos y necesidades.....	(58)

## **Capítulo 4 :**

### **Descripción de la instalación**

4.1 Generalidades.....	(63)
------------------------	------

4.2 Características Standard.....	(63)
4.3 Características del modelo.....	(64)
4.4 Características de los componentes.....	(64)
4.4.1 Componentes hidráulicos.....	(64)
4.4.1.1 Válvula de cierre.....	(64)
4.4.1.2 Puntos de dosificación de los aditivos.....	(65)
4.4.1.3 Medidor de temperatura.....	(65)
4.4.1.4 Montaje del pre-filtro.....	(66)
4.4.1.5 Válvula de muestreo del agua de alimentación .....	(66)
4.4.1.6 Bomba y motor .....	(67)
4.4.1.7 Válvula de estrangulación de la bomba.....	(67)
4.4.1.8 Montaje del módulo de ósmosis inversa.....	(68)
4.4.1.9 Componentes del agua de producto.....	(68)
4.4.1.10 Componentes del agua de desecho.....	(68)
4.4.1.11 Válvulas de retención.....	(69)
4.4.2 Componentes del panel de control.....	(69)
4.4.2.1 Indicador de luces.....	(69)
4.4.2.2 Monitor TDS.....	(70)
4.4.2.3 Monitor de tiempo transcurrido.....	(70)
4.4.2.4 Interruptor de baja presión y alarma.....	(70)
4.4.2.5 Relays de retardo.....	(71)
4.4.2.6 Interruptor de potencia.....	(71)
4.4.2.7 Relays del pretratamiento.....	(72)
4.4.2.8 Control de ph opcional.....	(72)

## **Capítulo 5:**

### **Evaluación Económica**

5.1 Antecedentes.....	(74)
5.2 Evaluación.....	(75)
5.3 Alternativas de solución.....	(76)

5.3.1	Alternativa I : Sistema de doble deionización.....	(77)
5.3.2	Alternativa II : Sistema de ósmosis inversa , deionización.....	(78)
5.4	Costo equipos.....	(79)
5.4.1	Alternativa I.....	(79)
5.4.2	Alternativa II.....	(81)
5.5	Ventajas y Aplicaciones del Sistema de Osmosis Inversa.....	(83)
5.5.1	Resultados obtenidos en la implementación del Sistema Osmosis Inversa –Deionización.....	(83)
5.5.2	Ventajas obtenidas.....	(83)
5.5.3	Otras aplicaciones de la Osmosis Inversa.....	(84)
5.5.3.1	Tratamiento de soluciones con alta presión osmótica.....	(84)
5.5.3.2	Tratamiento de soluciones con baja presión osmótica....	(85)
	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	(88)
	<b>Bibliografía</b> .....	(89)



## INTRODUCCION

La desalación por Osmosis Inversa, es el más nuevo de los procedimientos para desalinizar y purificar el agua de mar, lo mismo que otros tipos de aguas cargadas de sustancias inorgánicas y orgánicas.

Su uso se está extendiendo rápidamente, debido a su gran versatilidad y a los cada vez más reducidos costos de los equipos, y al valor del agua purificada o “permeada” por unidad de volumen.

Hablar de desalación o eliminación de sales es hablar de los procesos de separación que buscan la eliminación de los elementos que contiene un agua, sean de naturaleza física o química, y que plantean dificultades para su utilización con unos u otros fines.

De acuerdo con esos sistemas, para producir la eliminación o separación es necesario que exista algún elemento que actúe de barrera. Estas barreras físicas son las que constituyen la base de la mayoría de los procesos de separación que se realizan en la actualidad.

El elemento separador se conoce en unos casos como filtro y en otros como membrana, en función del tamaño de las partículas que es capaz de separar.

Cuando se trata de desalar, es decir separar los componentes químicos o iones del agua, su tamaño es tan pequeño que son necesarias las membranas.

Lo que se conoce por separación por membranas, o tecnología de membranas, incluye a todos aquellos procesos que se han desarrollado a lo largo de los años y cuyo objetivo es la separación de algún componente de una solución, sea éste sólido en suspensión, elementos en suspensión o iones, mediante la utilización de algún tipo de membrana.

En esta gama tan amplia de procesos se incluyen por tanto desde las más elementales formas de filtración hasta las más sofisticadas de ósmosis inversa.

En muchas parcelas de la técnica en general, cuando se habla de procesos de separación, se piensa fundamentalmente en la eliminación de elementos sólidos, de tamaño muy reducido si se quiere, pero que no superan el nivel macromolecular.

Los primeros sistemas de filtración de uno u otro tipo fueron ya introducidos en el siglo pasado y en algunos de ellos se mantienen sin demasiados cambios, como no sea el mejor conocimiento de los procesos y una investigación de los equipos o materiales a utilizar, que ha redundado en un aumento de la eficiencia.

Sin embargo, los avances en este siglo dentro del citado campo han sido relevantes, de manera que la separación a nivel micromolecular o iónico es hoy día una realidad.

El desarrollo de la tecnología de la desalación ha sido muy importante a lo largo de los años. La escasez de recursos en muchos lugares del mundo junto al crecimiento de la población ha influido de forma importante en la implantación de estas tecnologías, pero además el progreso de la sociedad industrial ha llevado a exigencias cada vez más notables en todos los campos respecto a la calidad del agua.

La desalación, que inicialmente tuvo una aplicación fundamentalmente para usos urbanos o domésticos, ha derivado posteriormente hacia otros como la industria y posteriormente la agricultura, y esto se ha debido principalmente a la irrupción de nuevas tecnologías más baratas y sencillas de implantación y de menor consumo energético. Debe resaltarse que este ha sido el principal motor de la investigación.

La dependencia energética que tienen todas las tecnologías llevó a partir de los años 60 a buscar un ahorro energético, que hasta entonces no había sido tomado muy en cuenta.

Aunque la desalación con fines de abastecimiento urbano, especialmente en el caso de agua de mar, sigue siendo la más importante por el tamaño de sus instalaciones y la capacidad total instalada, en los países industrializados las instalaciones de desalación con destino a la industria son muy numerosas y desde luego más importantes que las de agua urbana.

La principal aplicación de la desalación es la eliminación de sales o potabilización para adecuarla a la necesidades de la población o agrícolas.

Pero esta no es la única aplicación y de hecho la extensión de estas tecnologías a campos cada vez más amplios tiene más relación con las aplicaciones industriales que con los usos urbanos o agrícolas.

En el sector industrial existen numerosas industrias que requieren de un agua de elevada calidad para sus procesos, como la industria alimentaria o la electrónica, y asimismo existen otras en que el agua es utilizada como refrigerante y en este proceso se evapora, depositándose las sales sobre tuberías, calderas u otros equipos y reduciendo la eficiencia de los distintos procesos.

Se trata de aguas que podrían ser perfectamente utilizables en la agricultura o en los abastecimientos urbanos, pero que esos requisitos especiales exigen una eliminación más selectiva de iones. En muchos de los casos, el proceso comúnmente utilizado hace unos años era el intercambio iónico. La utilización de ósmosis inversa como fase previa al intercambio, reduce de manera considerable la regeneración de resinas prolongando su vida útil, a la vez que se rebajan de

forma notable los costes de los reactivos químicos y se reducen los vertidos altamente contaminantes de los procesos de regeneración.

Procesos más específicos como el decapado de pinturas, la eliminación de los taninos de los curtidos y cualquier otro tipo de vertidos industriales contaminantes, están cada vez más en la órbita de los procesos de desalación mediante membranas.

Los procesos de ablandamiento de aguas, consumidores de importantes cantidades de productos químicos, especialmente cal, están siendo sustituidos de forma ventajosa por la ósmosis inversa y más concretamente por la nanofiltración, que trabaja a presiones muy bajas y elimina la manipulación y usos de reactivos.

Por último, la reutilización de las aguas residuales de las estaciones depuradoras es una alternativa cada vez más viable frente a otros recursos convencionales, cada vez más escasos, distantes y caros de obtención.

Las membranas de ósmosis no solo eliminan iones sino que su reducido tamaño de poros permite la eliminación de bacterias y virus, y colabora en consecuencia en la desinfección de las aguas.

Asimismo en las zonas costeras el agua depurada es salobre y requiere ulteriores tratamientos para poder ser utilizada en la agricultura.

La utilización de membranas de ósmosis inversa, nanofiltración y electrodiálisis, según los casos, precedidas de un pretratamiento bastante sofisticado para eliminación de sólidos en suspensión, es también una alternativa cada vez más en uso.

## ***CAPITULO 1 :***

### ***SISTEMA DE SEPARACION POR MEMBRANAS : OSMOSIS INVERSA***

#### **1.1 Generalidades (1)**

El proceso de ósmosis inversa, fue desarrollado hace unos 40 años, como proceso industrial y en grandes plantas de desalación de agua de mar. En los procesos industriales se emplean presiones muy elevadas (desde 200 hasta 800 libras/ pulgada cuadrada) para separar los sólidos disueltos.

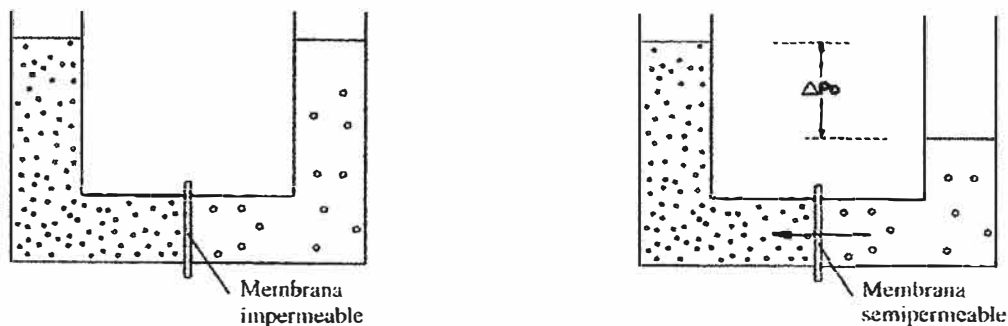
El fenómeno de la ósmosis lo descubrió originalmente un científico francés en 1748, al observar que el agua se difundía espontáneamente a través de una membrana de vejiga de cerdo hacia una cámara paralela de alcohol. Durante los 200 años siguientes este interesante concepto y su contrapartida la osmosis inversa, no pasó de ser una simple curiosidad de laboratorio. A mediados de la década de 1950 los trabajos del Dr. Sourirajan y otros de la Universidad de Los Angeles, adelantaron la tecnología de ósmosis inversa, hasta el punto que pudieron fabricarse membranas artificiales.

#### **1.2 Descripción del proceso (2)**

La tecnología de la ósmosis inversa se basa en el proceso de ósmosis, que es un fenómeno natural que se produce en las células de los seres vivos, por el cual dos soluciones de distinta concentración salina puestas en contacto a través de una membrana semipermeable tienden a igualar sus concentraciones.

Para ello se produce un movimiento desde la solución más diluida hacia la más concentrada, que se detiene cuando se alcanza un equilibrio entre ambas concentraciones. La fuerza que provoca este movimiento se conoce como presión osmótica y está relacionada con la concentración de sales en el interior de ambas soluciones. El proceso queda esquematizado en las figuras 1.1 y 1.2

Cuando dos soluciones de diferente concentración o salinidad están colocadas en dos recipientes separados por una pared impermeable, cada una de ellas alcanza en el depósito correspondiente una altura que es función únicamente del volumen de la solución y del diámetro del depósito. Si igualamos la altura de las soluciones en los dos recipientes, tendríamos la figura 1.1.a



Principios del proceso de ósmosis.

Fig. 1.1-a

Fig. 1.1-b

Si sustituimos la citada pared por una membrana semipermeable (permeable al agua, no a las sales) se produce un movimiento a través de la membrana desde la solución más diluida a la más concentrada, tal como aparece representado en la figura 1.1.b, que se detiene cuando se alcanza un desnivel entre ambos tubos,  $\Delta P_o$ , que corresponde a la presión osmótica de la solución más concentrada, o más propiamente a la diferencia de presiones osmóticas entre ambas soluciones.

Este valor  $\Delta P_o$  es la presión diferencial que impulsa el agua a través de la membrana. Si invertimos el proceso aplicando una presión en el tubo de la solución más concentrada, figura 1.2.a, el movimiento se produce desde esta hacia la más diluida.

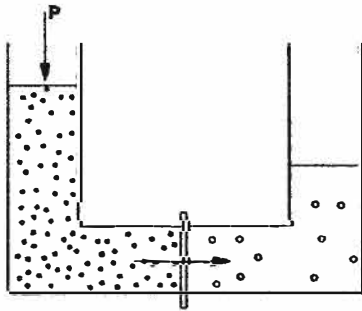


Fig. 1.2-a

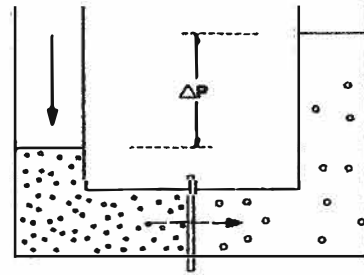


Fig. 1.2-b

Principios del proceso de ósmosis inversa.

La altura que alcanza la solución en el nuevo equilibrio es función de la presión aplicada, de las características de la membrana y de las concentraciones de ambas soluciones.

Este proceso es lo que constituye la ósmosis inversa.

Se le llama así porque para conseguir un flujo de solvente a través de la membrana hay que ejercer una presión suficiente para vencer la presión osmótica de la solución.

En la práctica, sin embargo, no es necesario vencer la presión osmótica de la solución de alimentación, sino solo la diferencia de presión osmótica entre las soluciones de alimentación y producto. Esta presión depende del flujo de agua a través de la membrana y cambia de cero hasta un límite dado por las características de la membrana.

Con las membranas reales puede producirse flujo con diferencias de presión que son pequeñas comparadas con la presión osmótica de la solución de

alimentación, pero la desalación, o mejor dicho el caudal desalado, es en estas circunstancias despreciable.

Si analizamos las distintas fases de este proceso vemos que los elementos fundamentales para poder reproducir este fenómeno a escala industrial lo constituyen la bomba necesaria para aplicar la presión y la membrana capaz de realizar la separación de sales.

Como se comprende, el elemento diferenciador de la ósmosis inversa frente a otros procesos es la membrana, la cual debe reunir una serie de características

- Debe ser capaz de resistir las presiones a la que se va a someter la solución para invertir el proceso.
- Suficientemente permeable al agua para que el flujo que proporcione sea elevado.
- Rechazar un porcentaje de sales elevado para que el producto sea de buena calidad.

Quizás pueda existir una cierta duda o ambigüedad respecto a cual es el proceso de ósmosis normal y cual el inverso.

Parece que el normal debería ser aquel en que el solvente fluye a través de la membrana desde una solución diluida hasta otra más concentrada y el flujo de soluto despreciable. Sin embargo, con las membranas reales también hay un flujo de soluto en dirección opuesta al flujo del solvente.

El contraste con la ósmosis en que los flujos son en la misma dirección, es por tanto incompleto y el término es en consecuencia impreciso.



### **1.3 Diferencias entre Ósmosis y otros procesos de membranas (2)**

Aunque en ocasiones se ha querido ver la ósmosis inversa como un proceso de filtración a escala molecular, se comprende fácilmente que la ósmosis inversa es un fenómeno claramente diferente de la filtración o microfiltración.

Los tres aspectos que marcan más claramente la diferencia son

- En la filtración todo el caudal atraviesa el elemento separador, que impide únicamente el paso de partículas sólidas de un determinado tamaño.  
En la ósmosis inversa en cambio, solo una parte del caudal de alimentación atraviesa la membrana constituyendo el producto, mientras el resto es eliminado sin atravesar la membrana y constituye el rechazo.
- En la ósmosis inversa no se produce la acumulación del material separado sobre la superficie de la membrana, como ocurre en el otro proceso, pues precisamente el rechazo produce el arrastre de dicho material.
- En la filtración el flujo de agua a tratar es perpendicular a la membrana, mientras que en la ósmosis es paralelo a ella.

Podría en cierta medida considerarse la ósmosis como una extensión de la ultrafiltración, en la que las partículas de dimensiones coloidales son separadas de sistemas dispersos, pasándolas a través de una membrana adecuada o filtro. Pero también existen diferencias entre ósmosis y ultrafiltración.

En este último proceso la forma en que se realiza la separación puede interpretarse como si se tratara de un cribado de partículas a través de una película o matriz provista de poros de las dimensiones adecuadas.

Sin embargo la separación de sales del agua no puede reducirse a unos términos geométricos tan simples, porque no hay una diferencia sustancial entre el tamaño de las moléculas de agua y el tamaño de muchos iones inorgánicos.

También es preciso separar claramente la desalación por ósmosis inversa del otro proceso de desalación que también utiliza membranas, que es la electrodiálisis.

Así, en la ósmosis, el agua es separada de las sales, mientras que en la electrodiálisis son los iones que constituyen las sales los que abandonan el agua, atraídos por electrodos de distinta carga.

Por otra parte la fuerza que rige el proceso de ósmosis inversa es la presión, mientras que en la electrodiálisis es el potencial eléctrico.

#### **1.4 Teorías de la Ósmosis (2)**

La membrana de ósmosis debe pues ser capaz de afectar a las propiedades termodinámicas y de transporte del agua y de las sales, mediante fuerzas que no dependen en principio del tamaño de los iones o moléculas que han de separarse.

Estas fuerzas pueden ser rango tan corto como las Van der Waals o de rango largo como las de Coulomb.

La forma en que se produce el paso de agua a través de la membrana responde a dos teorías

- Según Sourirajan (2), 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 materiales del agua de alimentación juega un importante papel en la determinación de su rechazo por la membrana.

- La teoría alternativa propuesta por Merten (2), parte de que la membrana no tiene poros y por tanto el flujo convectivo no puede existir.

En su lugar el agua se disuelve en la capa superficial de la membrana y después se difunde a través de una capa sin poros de la misma.

En este segundo modelo el rechazo es función de la solubilidad relativa del soluto y del solvente.

Este modelo de solución-difusión parece que permite predecir correctamente el comportamiento de las soluciones compuestas de una sal iónica, que actúan frente a la ósmosis como si se tratara de una filtración. Sin embargo su capacidad de predicción del comportamiento para los solutos orgánicos es menos fiable.

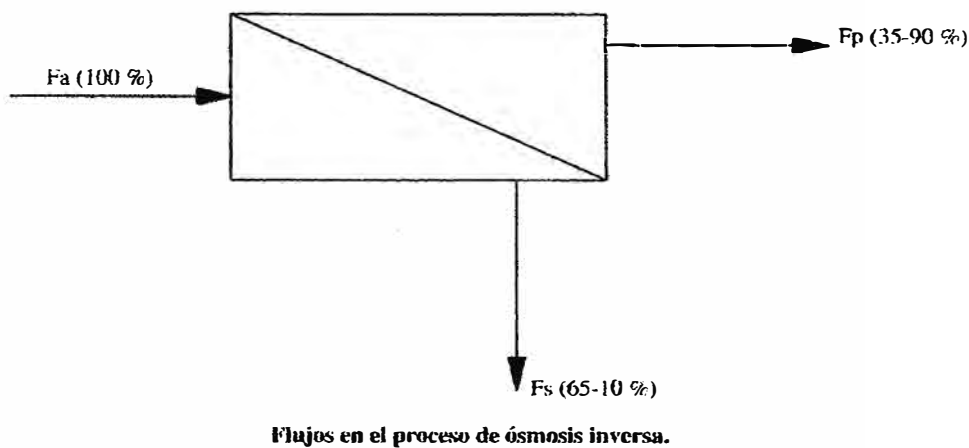
Ambos modelos predicen con bastante exactitud el flujo neto de agua, que descende al aumentar la presión osmótica a causa de la acumulación de solutos cerca de la superficie.

### **1.5 Ecuaciones Fundamentales (2)**

El proceso de desalación que acabamos de describir queda enmarcado por una serie de ecuaciones que definen o aclaran los distintos aspectos que deben conocerse, y que en última instancia permiten realizar el proyecto o diseño de las distintas instalaciones.

Partiendo de los flujos o caudales que se generan en el proceso se puede distinguir

- Flujo o caudal de alimentación, que es el que se pretende desalar y se aplica en un lado de la membrana :  $F_a$  .
- Flujo o caudal de producto, que corresponde al agua a la que se le han eliminado o reducido las sales :  $F_p$
- Flujo o caudal de concentrado (rechazo), que arrastra las sales que han sido separadas por la membrana y que se depositarían sobre ella :  $F_r$



**Fig. 1.3 Flujos en el proceso de ósmosis inversa**

La relación entre las citadas magnitudes es

$$F_a = F_p + F_r \dots \dots \dots (1)$$

Del mismo modo tendremos las concentraciones del agua de alimentación ,  $C_a$  ; producto,  $C_p$  ; y rechazo,  $C_r$ , relacionados entre si mediante

$$C_a.F_a = C_p.F_p + C_r.F_r \dots \dots \dots (2)$$

A partir de aquí se consideran las dos ecuaciones principales que hacen referencia a la membrana que son

### ***1.5.1 Ecuación de flujo de agua***

$$F_a = A (P_m - \Delta\phi_m) \dots \dots \dots (3)$$

Siendo :

$F_a$  = caudal de agua que atraviesa la membrana en  $l/m^2/hora$

$A$  = coeficiente de transporte de la membrana en  $l/m^2/hora.atm$

$P_m$  = presión diferencial a través de la membrana en atm, o  $Kg/cm^2$ .

$\Delta\phi_m$  – presión osmótica diferencial a ambos lados de la membrana, en atm o  $Kg/cm^2$ .

El coeficiente  $A$  es característico de cada membrana y depende de varios factores como son, el espesor de la membrana, la temperatura, o la composición química de la solución.

De esta ecuación se deduce que el caudal es directamente proporcional a la presión neta aplicada, es decir, a la diferencia de presiones que aparece entre paréntesis en la fórmula, y al coeficiente de transporte; es decir, a una característica propia de la membrana y a otra propia del funcionamiento.

Por ello, si el coeficiente de transporte aumenta, el caudal también lo haría, sin que fuera aumentar la presión neta. En estas condiciones mantendríamos el mismo caudal aplicando una presión menor. Esta es la característica principal que se busca, junto con el rechazo de sales, en el proceso de mejoras de membranas.

Como, de los dos caudales en que se bifurca el caudal a tratar, uno de ellos, la salmuera, concentra las sales rechazadas, estas en mayor o menor cantidad se van

acumulando sobre la superficie de la membrana, produciendo el fenómeno conocido como concentración de la polarización.

Este fenómeno incrementa la presión osmótica de la solución de concentrado y por tanto, de acuerdo con la ecuación anterior, haría disminuir la presión neta y en consecuencia el flujo o caudal de agua a través de la membrana.

Pero además el caudal de una membrana depende de otros factores como:

- Espesor de la membrana
- Dimensión de los poros y su distribución en la superficie de la membrana
- Condiciones hidrodinámicas

La disminución del espesor de la membrana ha sido una constante de la investigación a lo largo de los años, pero esta característica debe conjugarse con un tamaño de poros adecuado para rechazar un porcentaje suficientemente elevado de sales, y con una resistencia adecuada para soportar las presiones de funcionamiento.

En los últimos tiempos se han conseguido mejoras muy notables en membranas de agua salobre, que funcionan a bajas presiones; sin embargo, las membranas de agua de mar que deben soportar presiones muy elevadas no han logrado avances de la misma magnitud.

El caudal que atraviesa la membrana queda definido en unas condiciones de presión y temperatura predeterminadas, y en cada situación deben aplicarse las correcciones oportunas para adaptarlo a las condiciones reales de funcionamiento; esto es lo que se conoce como normalización de la membrana.

### ***1.5.2 Ecuación del transporte de sales***

$$F_s = K_s \cdot (C_a - C_p) \dots \dots \dots (4)$$

Donde :

Fs = flujo de sales, en  $\text{g/cm}^2/\text{seg}$

Ks = coeficiente de transporte de sales en  $\text{cm/seg}$ .

Ca = concentración de sales en el agua de alimentación,  $\text{g/cm}^3$

Cp = concentración de sales en el agua producto, en  $\text{g/cm}^3$

El coeficiente de transporte de sales es una característica de cada membrana.

La polarización aumenta la concentración de sales en el agua de alimentación, Ca, a medida que el caudal avanza a lo largo de la membrana. Por tanto, aumenta el flujo de sales Fs, y hace empeorar la calidad del producto.

En esta ecuación se ve que no existe dependencia directa entre la presión y el flujo de sales; es decir, al aumentar la presión no mejora el transporte de sales, ni por tanto tampoco el rechazo de sales.

En cambio, sí mejora el caudal del permeado, por lo que el efecto resultante es una mejora de la calidad, dado que la misma cantidad de sales se disuelven en un volumen mayor.

### **1.5.3 Rechazo de sales**

$$RS (\%) = (1 - C_p / C_a) \times 100 \dots \dots \dots (5)$$

Es el parámetro más importante de la membrana y se basa en el proceso de fabricación y en los polímeros que forman la membrana; constituye el *know-how* de cada fabricante. Sin embargo, este valor para cualquier membrana varía para los distintos iones. Los iones trivalentes, por ejemplo, son rechazados mejor que los divalentes y estos a su vez mejor que los monovalentes. El disminuir el peso molecular en este sentido es lo que ha llevado a veces a considerar la ósmosis inversa como una especie de filtración a escala molecular.

La sílice coloidal es también rechazada en un porcentaje muy elevado.

#### **1.5.4 Paso de sales**

$$PS (\%) = C_p / C_a \times 100 \dots\dots\dots(6)$$

Por tanto también,

$$RS = 100 - PS \dots\dots\dots(7)$$

La determinación de todos estos parámetros se hace en condiciones específicas determinadas por cada fabricante, aunque suelen standarizarse en cuanto a presión, temperatura, salinidad del agua preparada artificialmente, y en ocasiones recuperación.

#### **1.5.5 Recuperación**

También conocida como conversión o recobro del sistema (recovery), es el porcentaje de producto que se obtiene a partir de un determinado volumen de agua de alimentación

$$R (\%) = F_p / F_a \times 100 \dots\dots\dots(8)$$

$F_p$  y  $F_a$ , medidos en las mismas unidades,  $m^3$ /hora o  $m^3$ /día.

Este factor es muy distinto según se trate de membranas individuales o de módulos en los que intervienen más membranas colocadas en serie.

En las membranas espirales, por ejemplo, dicho factor no suele ser superior al 12-15% si se trata de agua salobre y del 10% en caso de agua de mar.



En membranas de fibra hueca, sin embargo, dicho factor se eleva hasta el 85% en agua salobre y al 60% en agua de mar.

Para elevar la conversión de un sistema de membrana es necesario incrementar el número de pasos o escalones de producción.

### **1.5.6 Concentración del producto**

$$C_p = (1-RS).(C_a + C_r) / 2 \dots \dots \dots (9)$$

### **1.5.7 Concentración del rechazo**

$$C_r = RS \times C_a / (1-R) \dots \dots \dots (10)$$

Este parámetro es importante conocerlo en el diseño, para establecer la forma de eliminación de un caudal, que según los casos puede ser importante y potencialmente contaminante.

En los casos de aguas salobres de salinidad moderada, puede incluso ser aprovechado recirculándolo a la cabecera del sistema.

A través de esta ecuación se ve también claramente como se puede influir en la calidad del rechazo para que no cree problemas en su eliminación, decidiendo desde el diseño de la instalación el tipo de membrana a elegir y la conversión del sistema.

Por ejemplo, para un agua con un contenido de sales de 2000 ppm podemos ver las consecuencias entre elegir membranas con un 87% o con un 98% de rechazo y conversiones del 65 o del 75%

$$C_{r1} = 0,87.2000 / (1-0,65) = 4972 \text{ ppm}$$

$$Cr_2 = 0,98 \cdot 2000 / (1 - 0,75) = 7840 \text{ ppm}$$

### **1.5.8 Proporción (ratio) de reducción**

$$Ca / Cp = 1 / (1 - RS) \dots \dots \dots (11)$$

Este factor es muy indicativo de la calidad de la membrana y sobre todo permite ver claramente la diferencia entre unas y otras.

Por ejemplo, si una membrana tiene un rechazo de sales del 98.5%, tendríamos:

$$Ca / Cp = 1 / (1 - 0,985) = 66,6 / 1$$

Y para un RS del 99%

$$Ca / Cp = 1 / (1 - 0,99) = 100 / 1$$

Es decir, que en el primer caso la reducción es de 66,6 a 1 y en el segundo de 100 a 1. Pero más significativo todavía es este valor en el caso de las membranas de agua de mar.

Si RS fuera del 99,3% sería :

$$Ca / Cp = 1 / (1 - 0,993) = 142,8 / 1$$

Pero si fuera solo un poco superior 99,5%

$$Ca / Cp = 1 / (1 - 0,995) = 200 / 1$$

Es decir que ese, en teoría, pequeño porcentaje del 0,2% mejora la calidad de una manera notable, casi en un 30%.

De ahí que para desalar agua de mar en una sola etapa se necesitan membranas con rechazo de sales igual o preferentemente superior al 99.3%.

### **1.6 Configuraciones de membranas (2)**

La membrana que realiza la separación es una lámina delgada que por si sola no soportaría los esfuerzos a que hay que someterla en el proceso de separación.

Además, por su reducido caudal unitario, precisería enormes desarrollos para poder tratar volúmenes importantes.

Por ello necesita ser integrada en una estructura mecánica que le permita tanto soportar los esfuerzos como ocupar el menor espacio posible.

Las membranas de ósmosis inversa que se han desarrollado a lo largo de los años se han estructurado en su configuración en torno a cuatro tipos principales

#### ***1.6.1 Membranas de tipo plano***

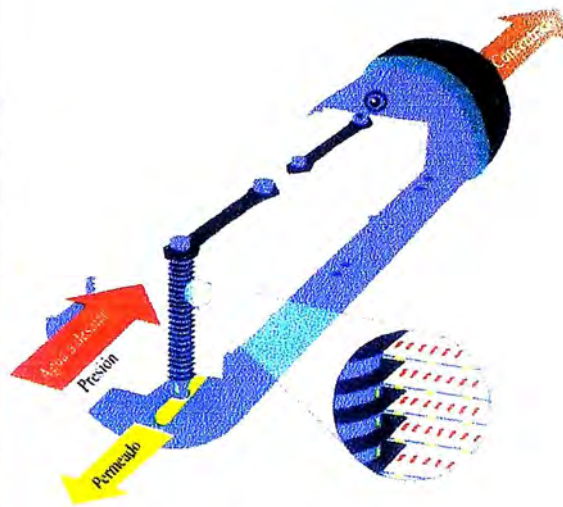
Es el tipo más sencillo y el que primero se utilizó. Están constituidas por una lámina que se coloca dentro de un marco, circular o rectangular, que actúa de soporte de la membrana y le confiere rigidez y resistencia. La superficie de estas membranas es pequeña, por lo que para aumentar la producción de los equipos que disponen de estas membranas, se colocan unas encima de otras, constituyendo una especie de pilas o columnas de membranas.

El principal inconveniente de este tipo de membranas es su pequeña capacidad productiva, por lo que para utilizarlas en instalaciones de tamaño medio se requiere numerosas membranas colocadas en pilas, que resultan voluminosas, pesadas e incómodas para operar y que encarecen enormemente su coste.

Su principal ventaja es que la separación entre membranas, de 1 a 3 mm, es amplia, por lo que se obstruyen menos que otras y además en caso de ensuciamiento se limpian fácil y eficazmente con aire y agua o, en caso de ensuciamiento persistente, desmontando las correspondientes pilas.



**Membrana plana circular.**

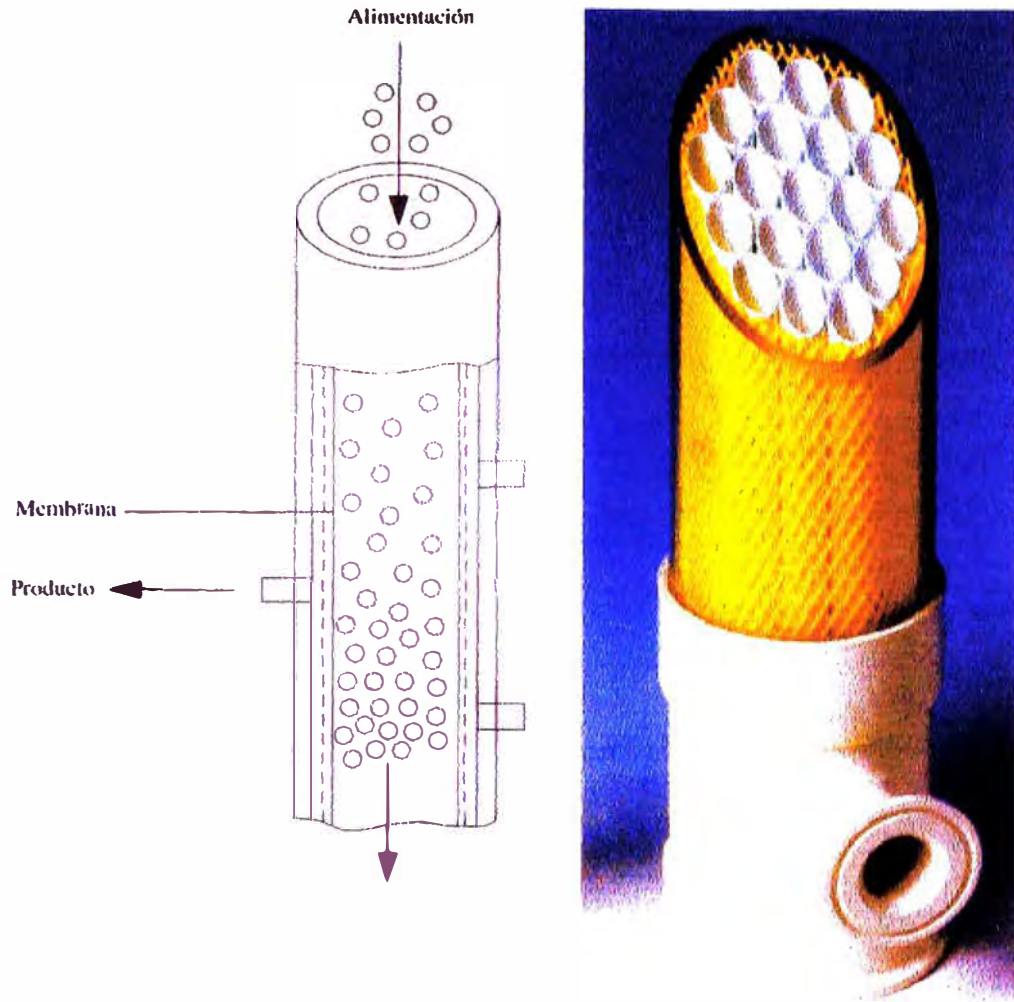


**Membrana plana rectangular.**

**Fig. 1.4**

### **1.6.2 Membranas tubulares**

Representan una alternativa a las anteriores, buscando conseguir una mayor superficie unitaria, pero sin renunciar a las ventajas de dificultad de ensuciamiento y fácil limpieza.



**Fig. 1.5 Membrana tubular**

La membrana, generalmente de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro, va alojada en el interior de un tubo de PVC, que soporta la presión del proceso. En algunos casos se colocan varias membranas en el interior de un tubo de 1.5 a 2" de diámetro. El tubo va provisto de los orificios necesarios para entrada y salida de los flujos de agua que intervienen en el proceso.

El agua alimenta a la membrana por su interior y el permeado se obtiene por la parte exterior de la misma. Para aumentar la capacidad de la instalación se colocan varios tubos en paralelo, pero aún en estos casos resulta pequeña.

Aunque algo más compactas que las anteriores siguen siendo demasiado voluminosas en relación con su capacidad productiva.

### 1.6.3 Membranas de fibra hueca

Están constituidas por un haz de millones de tubos capilares del tamaño de un cabello humano, huecos interiormente.

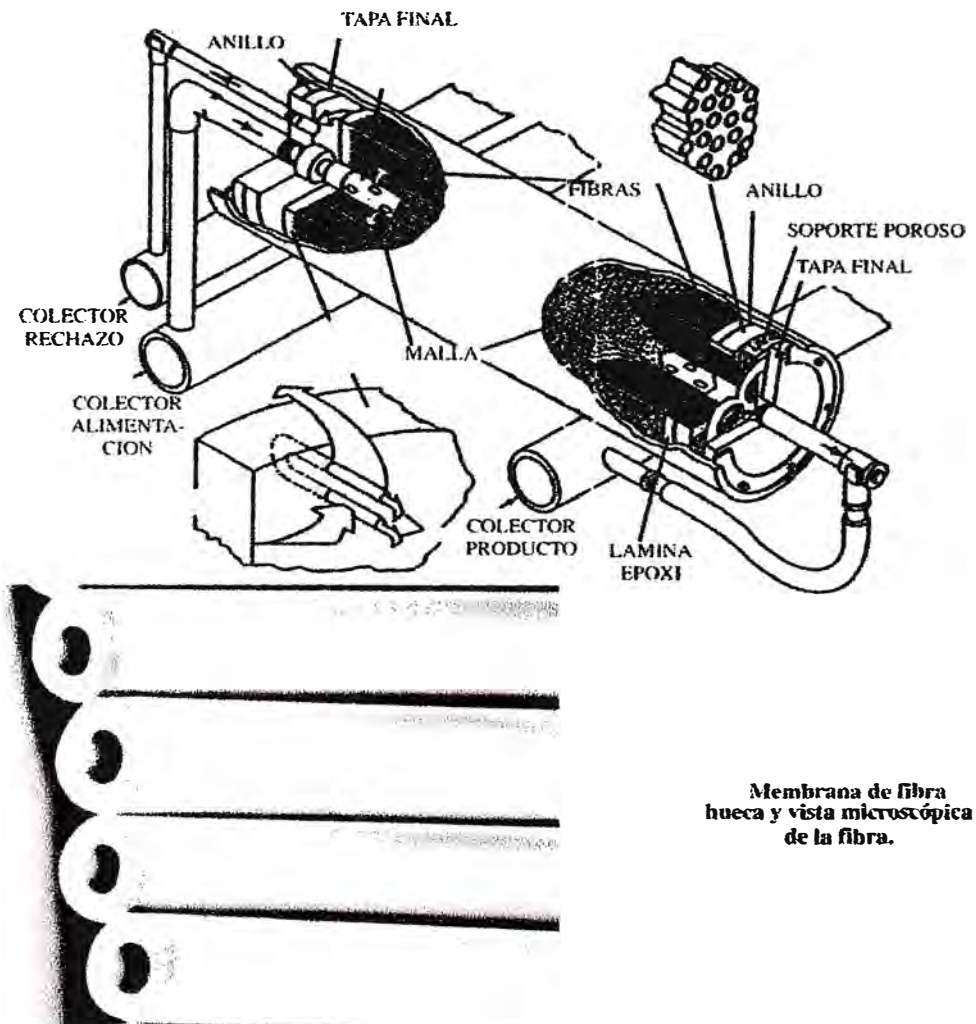


Fig. 1.6

Las primeras fibras que se desarrollaron de este tipo eran de acetato de celulosa y producían un caudal muy pequeño. Sin embargo, se consideró que

podrían ser útiles para desalación puesto que eran muy baratas de fabricar y muy delgadas.

Al comprobarse que la resistencia de la fibra no dependía tanto del espesor de la pared como de la relación entre los diámetros exterior e interior, se pensó que reduciendo su tamaño se podía conseguir una pared extremadamente delgada, que permitiría aumentar su caudal.

Esta delgadez permite su empaquetamiento en poco espacio, dentro de un tubo cilíndrico que constituye la carcasa protectora y permite la circulación de la solución a desalar.

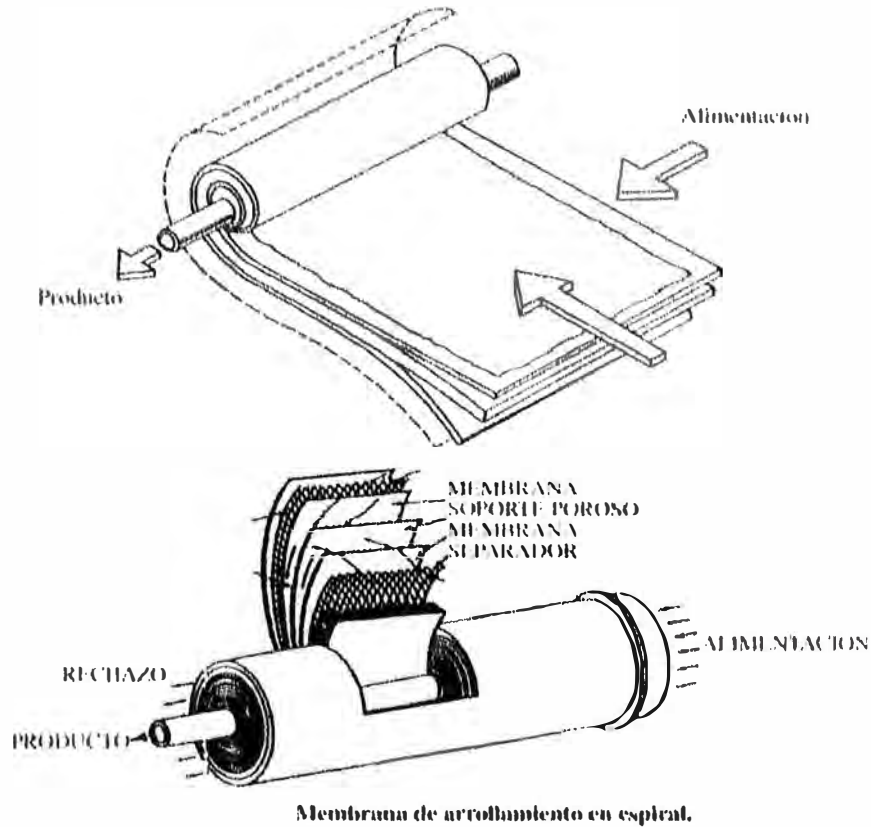
El agua a presión se aplica a la membrana desde el exterior del capilar y la pared de la fibra actúa como lámina o membrana separadora reteniendo las sales, mientras que por el interior o “alma” circula el agua producto que ha atravesado la membrana. La salmuera se desplaza de una manera radial hacia los bordes del tubo siendo recogida mediante un colector para su evacuación.

La superficie de estas membranas es muy grande dado que está constituida por el desarrollo de millones de tubos capilares.

Su caudal unitario es muy pequeño, pero extendido al haz de fibras que constituyen la membrana, determinan un caudal por membrana importante. El espesor de la pared de la fibra es muy grande en relación con su diámetro, lo que le permite soportar las altas presiones utilizadas. Las membranas de fibra hueca son fabricadas en la actualidad por solo dos firmas, Dupont y Toyobo.

#### ***1.6.4 Membranas de arrollamiento en espiral***

Están formadas por varias láminas rectangulares, que constituyen las membranas propiamente dichas, enrolladas alrededor de un eje cilíndrico provisto de perforaciones que permiten recoger el agua producto.



**Fig. 1.7 Membrana de arrollamiento en espiral**

Para el enrollamiento de las láminas desaladoras se disponen éstas alternadas con un separador impermeable y una malla, de forma que una membrana arrollada en espiral existen tantas láminas como separadores y mallas.

La malla plástica determina los canales hidráulicos por lo que circula el agua a tratar y por su forma cuadrículada garantizan un régimen de funcionamiento turbulento lo que reduce las posibilidades de obstrucción por elementos extraños.

El separador impermeable permite aislar el caudal que pasa por cada una de las láminas o membranas y separarlo de la salmuera.



El conjunto de membranas, mallas y separadores se sella mediante un pegamento por tres de los lados, mientras que por el cuarto lado que constituye la única salida posible para el agua que ha atravesado las membranas, se une el eje perforado.

Finalmente se cierra el conjunto con una envuelta exterior de poliéster con fibra de vidrio, que permite lograr una estanqueidad.

El enrollamiento permite introducir una gran superficie de membrana en un espacio reducido.

Con estos dos últimos tipos de configuraciones se ha conseguido reducir considerablemente el espacio ocupado por las membranas, aumentando la capacidad del módulo y reducido su precio.

En los tratamiento de desalación de agua, tanto salobre como de mar, para abastecimientos urbanos y agrícolas, solo se emplean estos dos últimos

Los fabricantes de membranas originales existentes en el mundo son también escasos, dado que únicamente se trata de dos japoneses y cinco norteamericanos.

Otros fabricantes de membranas que pueden encontrarse en el mercado, no son sino licenciarios de algunos de los anteriores.

Se trata en definitiva de los siguientes : Toray, Hidranautics, Fluid System, Filmtec-Down, Desal Nitto-Denko y Trisep.

### **1.7 Membranas Comerciales (2)**

Las membranas que se fabrican en la actualidad están normalizadas, con objeto no solo de poder ser comparadas entre sí, en torno a unas condiciones de

funcionamiento tipo, sino también y en el caso de las membranas de arrollamiento en espiral, poder sustituir unas por otras.

Esta normalización se basa fundamentalmente en el diámetro exterior de la membrana que suele ser de 4" u 8".

En cuanto a su longitud, las membranas espirales más comerciales suelen ser de un metro, aunque las de 8" se fabrican también de 1.5 m. Precisamente esta última longitud se está introduciendo cada vez más con objeto de aumentar el caudal, ya que se aprovecha mejor el espacio disponible.

Las membranas de fibra hueca, por su mayor capacidad unitaria, se consideran módulos individuales y sus diámetros comerciales son variables y específicos de cada fabricante. Ello impide por carácter general la sustitución de unas membranas por otras de distintos fabricantes.

Muy recientemente se han comenzado a producir, por uno de los dos únicos fabricantes de este tipo de membranas, unidades similares a las del otro, para poder reemplazarlas.

Respecto a las pruebas en que quedan caracterizadas, varían según que las membranas sean de agua de mar o salobre, pero tienen en cuenta en ambos casos

- La salinidad de agua de alimentación
- La temperatura del agua
- La presión de funcionamiento
- La recuperación por elemento

Para usos muy específicos se fabrican membranas espirales de 6", como ocurre con todas las instalaciones militares del ejército de Estados Unidos.

En alguna instalación grande y de forma excepcional se han construido en el pasado membranas de 12", hoy fuera de todo uso.

A este respecto resulta anecdótica la instalación de Yuma (Arizona) construida hace más de 10 años y proyectada con membranas este diámetro. La desaladora no se completó y únicamente se instalaron los tubos de presión. Hoy día completar la misma supondría la fabricación de unidades especiales de ese diámetro que no son elementos de serie de ningún fabricante.

Pero además de estas membranas que podríamos denominar industriales, dado que se utilizan para instalaciones de una cierta capacidad, también se fabrican actualmente otras membranas de arrollamiento en espiral que podríamos denominar "domésticas", para instalaciones caseras pequeñas y que pueden ser de 1,5", 2" y 2.5".

Estas membranas se fabrican en longitudes de 20, 30 y 40 " y no están sujetas a controles de calidad tan precisos como las anteriores.

Aunque los fabricantes citados anteriormente también fabrican este tipo de membranas, es un tipo de producto al alcance de industrias más pequeñas y que lo que realmente realizan es el enrollado de la película o membrana que compran a alguno de los fabricantes.

### **1.8 Diferencias principales entre membranas de fibra hueca y arrollamiento en espiral (2)**

Dejando a un lado las diferencias que existen en función del material constituyente, según sean poliamidas o derivados celulósicos, y que se recogen en otro lugar, existen algunas diferencias según sean las membranas de fibra hueca o arrollamiento en espiral.

Los otros tipos de configuraciones se ha mencionado que tienen un menor uso y en el apartado correspondiente a su descripción se exponían algunas de sus ventajas.

En cuanto a los dos tipos principales que nos ocupan, aunque no existen ventajas categóricas entre unas membranas y otras, a título informativo se pueden establecer las siguientes diferencias:

### **1.8.1 Caudal**

Las membranas espirales son más permeables, tienen mayor caudal unitario ( $l/m^2$ ) que las de fibra hueca, pero estas últimas, al tener más superficie por módulo, son finalmente de mayor capacidad. En consecuencia, en una instalación de una determinada capacidad de producción, las membranas de fibra son menos y por tanto ocupan menos espacio que las membranas espirales.

Esto queda reflejado en los siguientes datos comparativos para una membrana de 8" :

- Superficie activa eficaz
  - Membrana de fibra hueca, 575  $m^2$ .
  - Membrana de arrollamiento en espiral, 186  $m^2$ .
  
- Volumen ocupado
  - Membrana fibra hueca de 8" ; 42.5 litros.
  - Tubo de 8" con 6 membranas espirales, 227 litros.
  
- Caudal
  - Membranas de fibra hueca de 8", 388-555  $m^3/día$ .
  - Tubo seis membranas espirales 8", 49-68  $m^3/día$ .

### ***1.8.2 Presión de funcionamiento***

La menor permeabilidad de las membranas de fibra hueca exige mayores presiones transmembrana para vencer la presión osmótica. Por tanto, las presiones de funcionamiento suelen ser mayores.

Por ello la resistencia que deben soportar ambos tipos de membranas de fibra hueca de agua de mar se fabrican para soportar presiones de 84 Kg/cm<sup>2</sup> (1.200 psi), las de arrollamiento en espiral soportan 70,5 Kg/cm<sup>2</sup> (1.000 psi).

La consecuencia fundamental de esto es el mayor consumo energético que en general tienen las instalaciones de fibra hueca.

### ***1.8.3 Ensuciamiento***

La gran compactación que se consigue con los permeatos de fibra hueca determina espacios muy pequeños entre las fibras, normalmente inferiores a 20 micras.

En cambio en las membranas de arrollamiento en espiral los canales hidráulicos que se determinan mediante las mallas separadoras son bastante superiores, por lo que, al menos desde un punto de vista teórico, las membranas de fibra hueca son más propensas a ensuciarse u obstruirse que las espirales. De hecho los fabricantes de las primeras exigen que el SDI del agua a tratar sea inferior a 4, mientras que en las otras permiten valores de dicho índice no superiores a 5.

Pueden por tanto ser necesarios sistemas de pretratamiento más caros.

Las constantes mejoras que están introduciendo los fabricantes hace, sin embargo, que estas afirmaciones no sean categóricas, y que según el tipo de instalación la respuesta de un tipo u otro de membrana sea distinto de lo enunciado.

#### ***1.8.4 Rechazo de sales***

Las membranas de fibra hueca suelen tener rechazos inferiores a las de arrollamiento en espiral. Así como en estos últimos valores del 99.5% son normales y algún fabricante incluso ofrece productos con rechazos del 99.8%, los de fibra hueca no superan el 99.4%.

Sin embargo, a tenor de esta información podrá sorprender al lector encontrarse instalaciones de agua de mar con membranas de fibra hueca, que dan mejor calidad que las de arrollamiento en espiral, colocada en las mismas condiciones.

La justificación a esta aparente contradicción se encuentra en la mayor superficie de membrana que tienen las instalaciones de fibra hueca y la mayor recuperación por elemento, 35-50% frente al 10-15%. De esta forma las sales que atraviesan las membranas se disuelven en un volumen mayor desde la primera membrana, por lo que la concentración de este es menor y en consecuencia el producto de menor salinidad.

En las membranas de arrollamiento en espiral, como se colocan 6 o más en un mismo tubo, el permeado que sale de la primera membrana es de excelente calidad, pero a medida que el agua avanza a través de las membranas se va concentrando y la presión de alimentación descendiendo, por lo que en cada membrana el caudal producido es menor y la salinidad mayor que en la membrana anterior. El resultado final del tubo es el de la mezcla de las producciones de todas las membranas del mismo.

#### ***1.8.5 Pérdida de propiedades***

Las membranas van perdiendo con el tiempo algunas de sus características más importantes, como caudal o rechazo de sales. Se debe principalmente a la

compactación producida por las altas presiones aplicadas, y a la acumulación sobre su superficie de elementos disueltos o en suspensión que lleva el agua.

La limpieza con determinados productos químicos restaura en parte sus propiedades, pero las membranas de fibra hueca requieren además la aplicación de una capa química, que se adhiere a la superficie de la membrana y que es la responsable del rechazo de sales. Es decir, que actúa como si esta capa fuera una especie de membrana dinámica.

La aplicación de esta capa encarece la utilización de estas membranas, especialmente en condiciones difíciles que obligan a recurrir a limpiezas frecuentes.

Sin embargo, también se ha comprobado que esta capa actúa como barrera protectora de la matriz de la fibra, de forma que en situaciones de ambientes oxidantes o con productos extraños en el agua, es ésta capa y no la verdadera membrana la que se deteriora y por tanto puede ser sustituida fácilmente.

La recuperación en el rechazo que se consigue con esta capa dinámica es muy importante, de forma que incluso al cabo de varios años, las membranas producen después de la aplicación de dicha capa un agua de salinidad muy baja, aunque la persistencia en el tiempo de esta calidad es cada vez menor, obligando a aplicaciones cada vez más frecuentes.

En las membranas espirales, que no requieren este tipo de aplicación, la recuperación del rechazo es menos espectacular.

## **1.9 Colocación de las membranas (2)**

Las membranas tienen una superficie limitada y también una producción determinada. Como por otra parte el porcentaje de recuperación por elemento es

relativamente pequeño, 10-50%, si colocáramos un solo elemento en la instalación, una gran parte del caudal de agua a tratar sería desperdiciado como salmuera, con la consiguiente ineficiencia del sistema.



**Fig. 1.8 Colocación de membranas**

Para aprovechar mejor el caudal de salmuera, las membranas se colocan en serie, para que el rechazo de una membrana sea utilizado como alimentación de la siguiente.

Los tubos de presión con capacidad de 6-7 membranas , para membranas de arrollamiento espiral y la colocación por parejas de los permeatos de fibra hueca, mejoran esta recuperación, pero aún así su capacidad sigue siendo limitada.

Para adaptarse a la producción deseada deben colocarse por tanto los distintos módulos en paralelo. De aquí surgen los distintos tipos de estructuras de producción en que se colocan las membranas. Para comprender su explicación es necesario comprender dos conceptos importantes



### **1.9.1 Etapa**

Es cada una de las unidades de producción que son alimentadas desde una fuente única (bomba de presión). Es decir, un conjunto de tubos de presión o de membranas de fibra hueca colocadas en paralelo y alimentadas por una bomba constituye una etapa.

Si para aumentar la eficiencia de la instalación, el rechazo de los tubos de presión o permeatos, que sale a una determinada presión, se introduce en otro tubo de presión o membrana, estos tubos o permeatos constituyen otra etapa.

Se comprende fácilmente que al aumentar el número de etapas de una instalación, se eleva el caudal recuperado como producto.

Sin embargo, como al pasar el agua de alimentación de una membrana a otra, se va incrementando su salinidad y el rechazo de sales de la membrana no varía, de acuerdo con la ecuación (4) aumenta el flujo de sales y por tanto empeora la calidad.

Es decir, que al aumentar el número de etapas empeora la calidad del agua producto

### **1.9.2 Paso**

Es el conjunto de tubos de presión o membranas que siendo alimentadas con los caudales de agua que salen de las membranas de la primera etapa de la ósmosis precisan de otra fuente de energía distinta de la anterior para recuperar un nuevo caudal.

Resumiendo, si el caudal de agua producto o el caudal de rechazo de una instalación de ósmosis es rebombado mediante otra bomba que se eleva su anterior presión, para alimentar a otro conjunto de membranas, estamos hablando de un paso.

A partir de aquí tendríamos las siguientes estructuras de producción

### 1.9.3 Estructuras de Producción

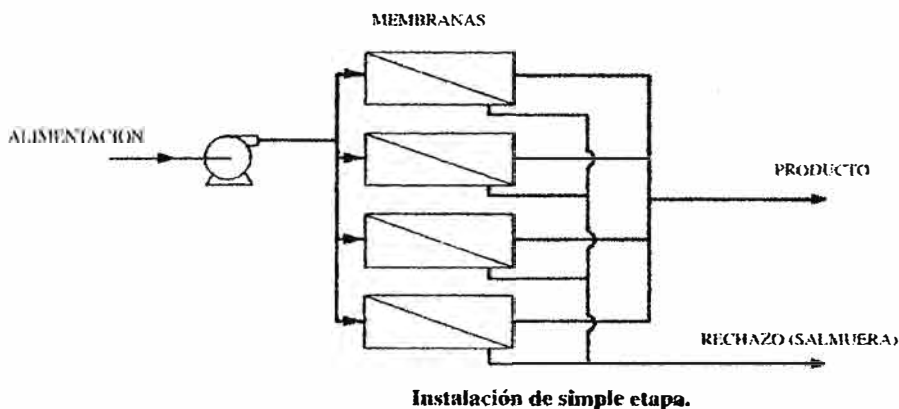
#### 1.9.3.1 Simple

Es un conjunto de membranas individualmente o en tubos de presión, colocadas en paralelo, que son alimentadas desde una bomba.

Este tipo de estructura, demasiado ineficiente, solo se usa en instalaciones piloto o experimentales, o en la industria para extracción de jugos u otros líquidos o sólidos de gran valor.

También las instalaciones de agua de mar, por su baja recuperación, admiten este tipo de estructura.

La figura 1.9 muestra el esquema de una instalación de este tipo.

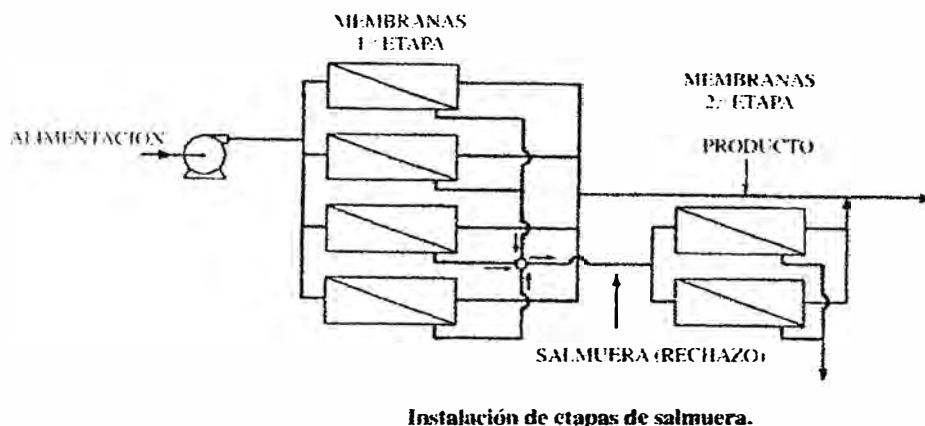


**Fig. 1.9 Instalación de simple etapa**

### 1.9.3.2 Etapas de salmuera

Es la estructura más frecuente de producción y consiste en una serie de tubos colocados en paralelo y otros en serie, de forma que la salmuera de los primeros es utilizada como alimentación de los segundos

La figura muestra el esquema de una instalación de este tipo.



**Fig. 1.10 Instalación de etapas de salmuera**

Como puede verse, dado que en cada etapa se recupera una parte de producto, el caudal de salmuera que llega a la segunda etapa es menor que el inicial y así sucesivamente, por lo que en cada etapa disminuye el número de tubos.

De acuerdo con las características de recuperación de la membrana, el porcentaje máximo de recuperación por tubo de presión de 6 elementos es del 50%, por lo que el máximo de etapas que se suelen colocar son tres. Mediante la primera se recuperaría el 50%, mediante la segunda un 25 % (50% del caudal de salmuera de la primera) y mediante la tercera un 12.5% (mitad del caudal de salmuera de la segunda etapa). En total sería un 87.5%. Recuperaciones superiores son difíciles y no justificarían un cuarta etapa; sería preferible recuperar algo más del límite del 50% en cada una de las tres etapas.

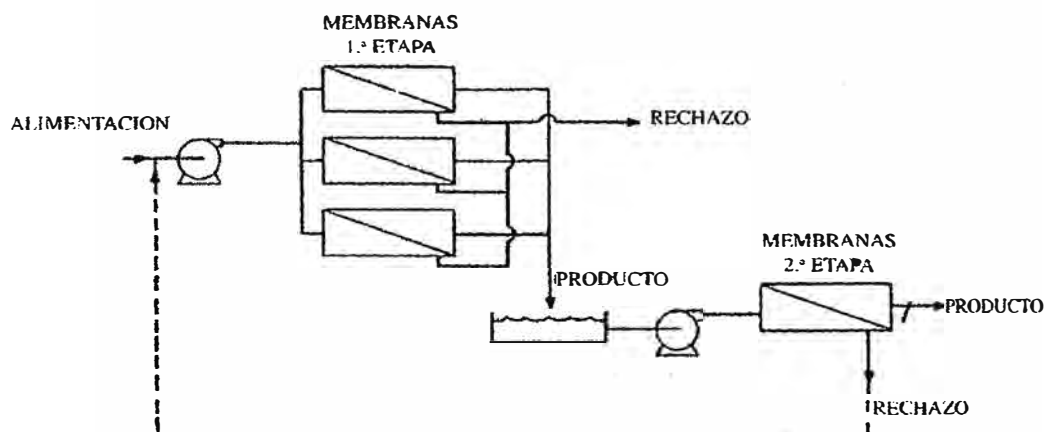
En cualquier caso este límite del 50% no es absoluto, sino solo una referencia prudente que dan los fabricantes de membrana y que se utilizan en el diseño.

El diseñar una instalación con dos o tres etapas no depende solo de los gustos del proyectista y de la necesidad de recuperar un gran porcentaje del agua tratada sino sobre todo de la composición química del agua.

A medida que se recupera un porcentaje mayor, la salmuera va incrementando su concentración, y son las solubilidades de los iones presentes los que determinarán la capacidad de recuperación de la instalación y por tanto el número de etapas.

### 1.9.3.3 Etapas de producto

Este tipo de instalación se emplea cuando se quiere mejorar la calidad del agua producto y para ello se pasa de nuevo por otro conjunto de membranas, utilizando para ello una bomba independiente.



Instalación de etapas de producto.

**Fig. 1.11 Instalación de etapas de producto**

Su utilización es cada vez menor, inicialmente se empleaba en las instalaciones de agua de mar en las que era imposible conseguir una agua de suficiente calidad con un solo paso, especialmente en zonas de alta salinidad como en los países del Golfo Pérsico.

La posterior aparición de, membranas de agua de mar con rechazos superiores al 99.3%, que permiten obtener agua potable en un solo paso, ha hecho innecesario este tipo de instalaciones.

Hoy día se siguen utilizando sin embargo en la industria, cuando se precisan aguas de calidad superior, o en otras instalaciones, para prolongar la vida de las membranas de primera etapa. En este último caso solo una parte del caudal producto de la primera etapa se pasa por esta segunda etapa, mezclándose el conjunto de ambas etapas para obtener un permeado intermedio entre ambas.

Por lo dicho anteriormente, las etapas de producto coinciden también con lo que se ha llamado instalaciones de varios pasos.

## ***CAPITULO 2 :***

### ***DESCRIPCION DE LA EMPRESA DE ESTABILIZANTES PARA PVC***

#### **2.1 La Empresa**

*COMPañÍA QUIMICA S.A.*, es una industria que produce para industrias. Los productos que ofrece son indispensables en la elaboración de materiales tan diversos como los plásticos, cauchos, pinturas, tintas, adhesivos, impermeabilizantes, cosméticos, aceites, grasas lubricantes y muchos más.

Sus actividades se inician en 1967, y durante más de 30 años de evolución continua, se ha logrado una profunda penetración en los mercados local y latinoamericano e iniciado exportaciones hacia América del Norte, Europa y también Sudáfrica.

El control de calidad de materias primas y productos terminados, el servicio técnico, el empleo de tecnologías de eficacia comprobada a escala mundial y el incesante trabajo de investigación, ha permitido brindar materiales y servicios de nivel internacional.

El deseo de contribuir a la mejora de los aspectos relacionados con la protección de la salud, la seguridad y el ambiente, indujo a participar como fundador y miembro adherente al Programa “Conducta Responsable con el medio Ambiente”, que desde 1996 y siguiendo el modelo de programas establecidos en Canadá, Estados Unidos de América, Reino Unido, Australia y Francia, ha sido adoptado en el Perú por el Comité de la Industria Química de la Sociedad Nacional de Industrias.

La necesidad de vencer los nuevos retos que presenta la integración de los mercados en el contexto de la “globalización de las economías”, sugiere que las empresas deban desarrollar nuevas capacidades que satisfagan los requerimientos de industrias cada vez más exigentes.



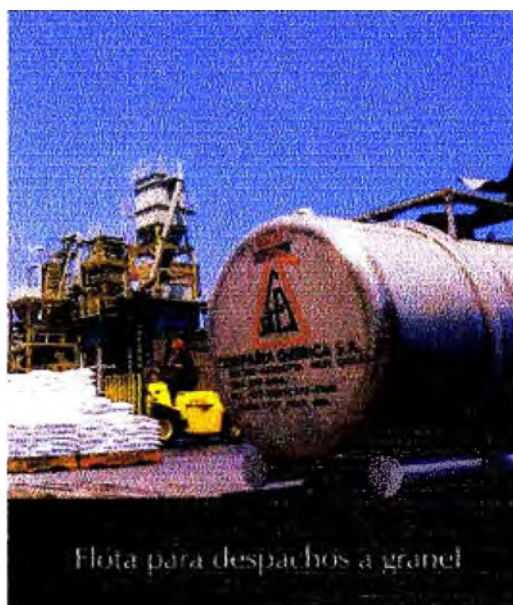
**Fig. 2.1 Planta de Estabilizantes Sólidos**

Dentro de este contexto, Compañía Química S.A., mantiene una constante actualización de su tecnología a través de empresas asociadas líderes y de reconocido prestigio en Argentina y Brasil sumándose a ello la realización, durante 1995, del “joint venture” con el *Grupo Barlocher*, reconocido como líder mundial en la producción, investigación y desarrollo de Estabilizantes para PVC y como principal productor de aditivos para polímeros.

Los clientes pueden consultar en cualquier momento por información técnica o muestra de los productos que sean de su interés, así como para el apoyo por el



Laboratorio de Control de Calidad e Investigación y Desarrollo , en sus procesos productivos.



**Fig. 2.2 Tanque Cisterna despacho DOP  
(Diocil Ftalato)**

El estricto control de las materias primas, procesos de fabricación y control de productos terminados y servicio post venta, han servido para poder obtener en Junio del 2001, la Certificación del Sistema de Calidad ISO 9001 para la Fabricación y Comercialización de Productos Químicos para industria del PVC, otorgado por la empresa certificadora *Boreau Veritas*.



## **2.2 Línea de productos**

Dentro de la línea de productos que ofrece la empresa, se enumeran los siguientes

### **2.2.1 Estabilizantes**

Estabilizantes para resinas de cloruro de polivinilo PVC, en aplicaciones plastificadas o rígidas.

#### ***Aplicaciones genéricas :***

- Extrusión de tubos y perfiles
- Inyección de conexiones y calzado plástico
- Recubrimiento de cables eléctricos
- Laminados calandrados con y sin soporte
- Plastisoles

#### ***Productos en polvo***

- Estearato normal de plomo
- Estearato monobásico de plomo
- Estearato dibásico de plomo
- Sulfato monobásico de plomo
- Sulfato tribásico de plomo
- Ftalato dibásico de plomo
- Sulfito-fosfito dibásico de plomo

#### ***Productos líquidos***

- Estabilizante líquido de Ba-Cd-Zn-P
- Estabilizante líquido de Cd
- Estabilizante líquido de Zn

***Productos en pasta***

- Estabilizante en pasta de Ca-Zn
- Estabilizante para inyección de conexiones

***Productos en escamas***

- Estabilizante escamado de Ba-Cd
- Estabilizante escamado para recubrimiento de cables eléctricos
- Estabilizantes escamados para extrusión de tubos corrugados
- Estabilizantes escamados para extrusión de tubos, uso general
- Estabilizantes escamados para extrusión de tubos con alto nivel de carga
- Estabilizantes escamados para tubos de gran diámetro
- Estabilizantes escamados para extrusión de perfiles

Estos últimos productos en forma de escamas, eliminan la contaminación ambiental por el uso de polvos y contienen la totalidad de los aditivos necesarios para la elaboración del compuesto de PVC. Contribuyen a la mejora de la productividad al simplificar las operaciones de pesado y formulado , y al reducir las proporciones de uso con respecto a los ingredientes anteriormente usados.

***2.2.2 Oxidos***

Fabricados a partir de metales de pureza electrolítica, con métodos que aseguran calidad uniforme.

***Aplicaciones genéricas***

- Pigmentos
- Industria procesadora del vidrio
- Industria cerámica
- Pinturas
- Estabilizadores para PVC
- Fungicidas

- Acumuladores automotrices

### ***Producto***

- Oxido de Plomo (Litargirio)

### ***2.2.3 Plastificantes***

Plastificantes para resinas de cloruro de polivinilo PVC, en aplicaciones plastificadas o semirígidas, para copolímeros de PVC y otros polímeros para caucho, etc.

### ***Aplicaciones genéricas***

- Extrusión de perfiles plastificados
- Inyección de calzado plástico
- Recubrimiento de cables eléctricos
- Laminados calandrados con o sin soporte
- Plastisoles
- Lacas selladoras
- Pinturas

### ***Productos***

- Di Butil Ftalato
- Di Butil Maleato
- Di Octil Ftalato ( DOP)
- Di Octil Adipato (DOA)
- Di Isodecil Ftalato
- Tri Octil Trimelitato
- Plastificante polimérico de peso molecular alto

#### **2.2.4 Secantes**

Agentes secativos y catalizadores caracterizados por un contenido exacto de metal activo que puede ser ajustado a las necesidades del cliente. Las concentraciones indicadas en las descripciones siguientes, corresponden a los valores comerciales del mercado local.

#### ***Aplicaciones genéricas***

- Aceleradores en procesos con resinas poliéster
- Tintas
- Lacas
- Pinturas
- Preservantes para madera

#### ***Productos***

- Octoato de Plomo al 24%
- Octoato de Cobalto al 6%
- Octoato de Manganeso al 6%
- Octoato de Zinc al 8%
- Octoato de Calcio al 4%

#### **2.2.5 Otros aditivos**

Amplia gama de productos para el procesamiento de cloruro de vinilo fabricados por *COMPAÑÍA QUÍMICA S.A.* o sus asociados *Barlocher* y *Lestar Química* que incluye ésteres y sales de ácidos grasos, amidas, ceras parafínicas, mezclas lubricantes, entre otros como

- Estabilizantes sólidos y líquidos a base de Calcio/Zinc
- Estabilizantes sólidos y líquidos a base de Estaño
- Catalizadores de expansión líquidos a base de Zn, Ba/Zn, Ba/Cd, K/Zn
- Lubricantes internos, externos y complejos para PVC
- Plastificantes epoxidados

- Agentes quelantes
- Agentes de expansión
- Estearatos metálicos

### ***CAPITULO 3 :***

#### ***FUENTE DE AGUA Y USOS***

COMPañÍA QUIMICA S.A. se abastece de agua subterránea, motivo por el cual se analizará las características de estas fuentes.

##### **3.1 Agua subterránea (2,3)**

Constituyen la tercera fuente de aportación de aguas en general y consecuentemente de aguas salinas en particular.

El agua profunda se suele mover muy lentamente. Su flujo se mide en pies por año en comparación con las corrientes superficiales, cuyas velocidades se ven en pies por segundo. Debido a esto la composición de cualquier pozo es por lo general bastante constante. Aunque los pozos poco profundos pueden variar estacionalmente en su temperatura, la mayor parte de los pozos también mantiene constante su temperatura, generalmente en el rango de 50-60 °F (10-16 °C).

Puesto que el agua a pasado a través de millas de formación de rocas porosas, invariablemente está clara si el pozo se ha perforado adecuadamente evitando que la arena fina entre en el recubrimiento.

Debido a que la composición está relacionada con la química de las formaciones geológicas a través de las cuales haya pasado el agua, las aguas de los pozos perforados en diferentes estratos tienen características diferentes

Las causas de la contaminación por sales de las aguas subterráneas son conocidas. Se trata de procesos físico-químicos y hasta biológicos de alteración de los materiales que forman el terreno y en los que el agua queda almacenada hasta que es extraída (meteorización, oxidación, reducción, lavado, etc.).

La composición de las aguas subterráneas es más variable que la de los ríos y además de los iones normales como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^-$  ó  $\text{SO}_4^{-2}$ , aparecen en mayores cantidades  $\text{PO}_4^{-3}$  o  $\text{NO}_3^-$  y algunos microelementos como B,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{SiO}_2$  ó  $\text{F}^-$ , que pueden ser importantes en función del ulterior uso o tratamiento que se quiera hacer de esa agua.

Pero además de este incremento de la salinidad de las aguas subterráneas por causas menos naturales, también se produce con frecuencia por causas inducidas externamente y generalmente ligadas a un bombeo excesivo.

Esta contaminación por intrusión es más frecuente en las zonas costeras, pues una extracción excesiva en pozos playeros crea una depresión en el cono de agua dulce, que es reemplazada por agua de mar (intrusión marina).

En zonas del interior, el incremento se produce al tener que profundizar cada vez más el pozo para poder seguir manteniendo la producción, alcanzándose aguas fósiles o movilizándose reservas subterráneas de otras zonas de peor calidad.

Sin embargo, así como en el primer caso el empeoramiento de la calidad va ligada a un aumento importante del contenido en sodio y cloruros, en el segundo puede estarlo al de sulfatos, carbonatos, Calcio y Magnesio.

En el Cuadro 3.1 pueden verse diferencias de composición química importantes entre distintos pozos

**Cuadro 3.1 : Calidad de agua subterránea en distintos pozos**

<b>Pozo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>PH</b>	7.9	8.0	6.9	6.9	7.6	7.1	7.1	8.5	8.0	8.88	6.6	8.6
<b>CE</b>	4235	7680	7260	9220	5800	1924	2280	2540	1627	3070	5750	4690
<b>TDS</b>	2751	4597	4013	5068	3424	1916	1988	2258	1516	3004	3600	4063
<b>Ca 2+</b>	34.9	48.0	263	413	10.4	11.6	2.2	0.4	0.8	2.4	118	7.21
<b>Mg +2</b>	139	227	275	340	11.5	58.3	109	95.2	170	113	270	19.5
<b>Na +</b>	597	1250	759	966	1176	368	371	449	160	665	727	1250
<b>K+</b>	52	35	51	55	23	58	33	52	12	27	47	43
<b>CO3 2-</b>	0	0	0	0	0	0	0	58.5	0	72.9	0	113
<b>CO3H-</b>	904	623	305	360	306	1245	1114	1194	904	1615	358	1601
<b>SO4 2-</b>	122	234	168	223	252	114	154	203	157	277	298	526
<b>Cl-</b>	842	2121	2184	2925	1617	24.1	168	149	80.8	200	1691	504
<b>NO3-</b>	1.24	8	8	9	17	7.4	11.8	14.9	9.3	3.1	2.48	2.2
<b>F-</b>	0	0	0	0	0	1.5	0.2	0.2	0.2	0.3	0	0.1
<b>SiO2</b>	60	51	28	40	13	30	25	51	21	28	32	8

### **3.2 Características del agua subterránea**

Las características del agua de pozo (análisis Junio-1999) de COMPAÑÍA QUIMICA S.A. , se muestran en el Cuadro 3.2:



**Cuadro 3.2: Analisis de agua de pozo de Compañía Química S.A.**

<b>ANÁLISIS</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>RESULTADO (mg/L)</b>
Cloruros	EPA 325.3	196
N – Nitratos	EPA 352.1	4.40
N – Nitritos	EPA 354.1	0.060
Sulfatos	EPA 375.4	635.6
Carbonatos	SM 4500 CO <sub>2</sub> -D	N.D.
Bicarbonatos	SM 4500 CO <sub>2</sub> -D	203.9
Nitrógeno Amoniacal	SM 4500 NH <sub>3</sub> -D	0.07
Fluoruros	EPA 340.2	0.08
Calcio	EPA 200.7	295.9
Magnesio	EPA 200.7	34.65
Sodio	EPA 200.7	104.4
Potasio	EPA 200.7	5.88
Bario	EPA 200.7	0.032
Estroncio	EPA 200.7	2.294
Fierro	EPA 200.7	0.294
Manganeso	EPA 200.7	0.200
Cobre	EPA 200.7	N.D.
Zinc	EPA 200.7	0.008
Aluminio	EPA 200.7	0.22
Sílice	SM 4500 SiC	N.D.

**Fuente :Envirolab-Perú**

### 3.3 Usos y necesidades

COMPAÑÍA QUÍMICA S.A. se suministra de agua de pozo, la cual luego de efectuarle el respectivo tratamiento, es utilizada en

- *Agua para proceso*

La mayoría de procesos de fabricación de los Estabilizantes Sólidos en polvo, se realizan por vía húmeda, para posterior secado. Debido a las características de los productos y principalmente por su aplicación (recubrimiento de cables eléctricos por ejemplo), existe la necesidad de utilizar un agua de alta calidad con una resistividad de 500 000 ohm/cm (1 ppm de TDS).

- *Agua para suministro*

Utilizada para la producción de vapor en calderos pirotubulares (150 y 300 BHP), condensadores y torres de enfriamiento.

El diseño inicial para la instalación del Sistema de ósmosis inversa, se realizó para una producción de 35 m<sup>3</sup>/día.

Posteriormente, debido a la adquisición de nuevos equipos en la Planta de Estabilizantes Sólidos, hubo la necesidad de incrementar la producción de agua osmotizada a 50 m<sup>3</sup>/día.

Debido a las necesidades de agua de proceso, es que se plantea dos alternativas del tratamiento de agua de pozo.

La primera alternativa, consiste en un Sistema de Doble Deionización (Fig.3.1) y la segunda un Sistema de Tratamiento por Osmosis Inversa en combinación con un Sistema de Deionización. (Fig. 3.2).

Luego del estudio de las dos alternativas de solución, se decidió por la segunda.

La disposición actual de la Planta de Compañía Química se esquematiza en la Fig. 3.3.

En el siguiente capítulo se presenta la descripción del Equipo de Osmosis Inversa , para luego describir la Evaluación Económica de las dos alternativas inicialmente propuestas.

ALTERNATIVA I

SISTEMA DE DOBLE DEIONIZACION CULLIGAN

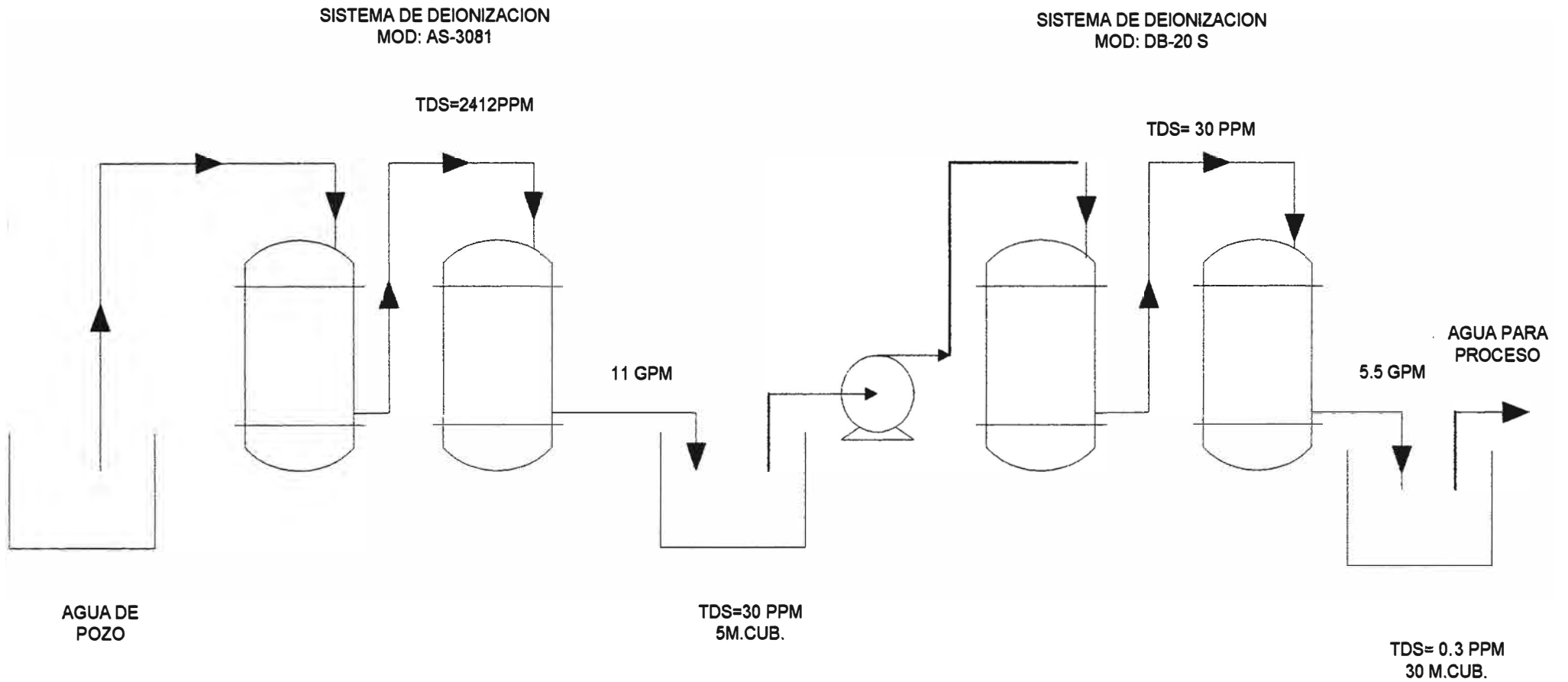


FIG. 3.1

ALTERNATIVA II :  
SISTEMA COMBINADO  
OSMOSIS INVERSA Y DEIONIZACION CULLIGAN

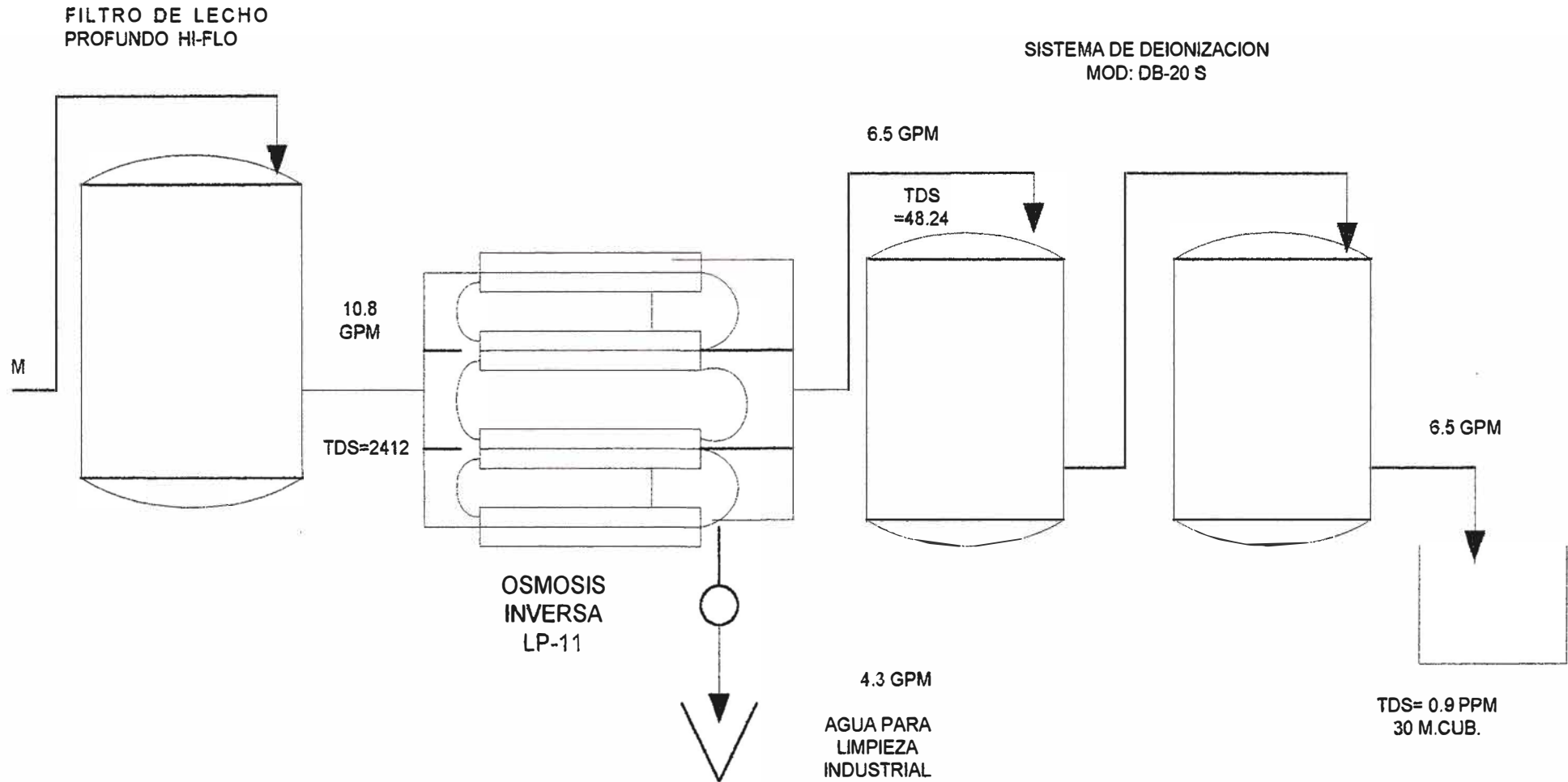
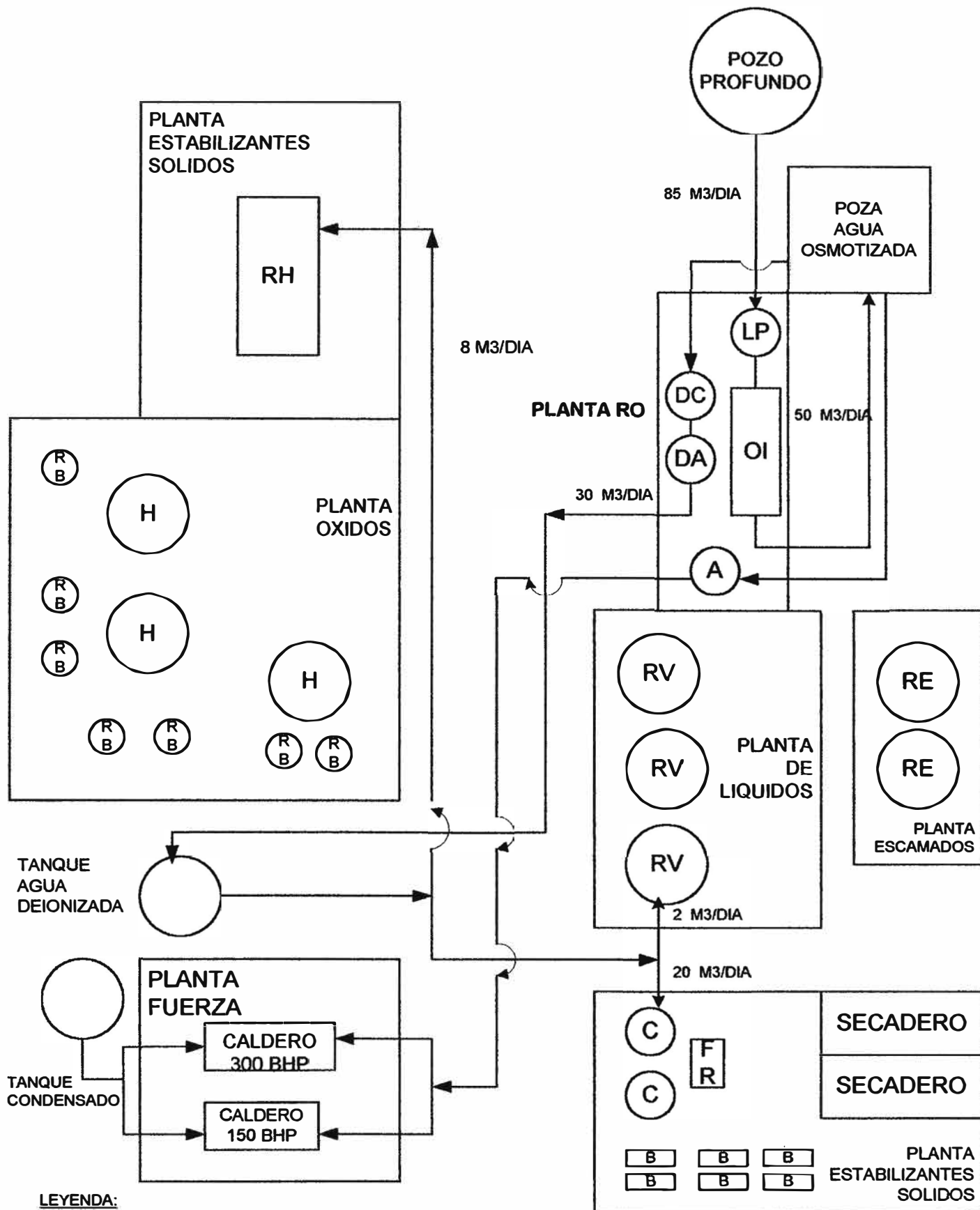


FIG. 3.2

PLANTA COMPAÑIA QUIMICA S.A.



LEYENDA:

LP: FILTRO LECHO PROFUNDO  
 DC: DEIONIZADOR CATIONICO  
 DA: DEIONIZADOR ANIONICO  
 RH: REACTOR HORIZONTAL  
 RE: REACTOR ESCAMADO  
 RV: REACTOR VERTICAL

A: ABLANDADOR  
 H: HORNO  
 B: BANDEJAS  
 C: CUBAS  
 OI: EQUIPO OSMOSIS INVERSA  
 RB: REACTOR BARTON  
 FR: FILTRO ROTATIVO AL VACIO

Fig. 3.3

- Sistema de cartuchos de pre-filtración, con elementos reemplazables que remueven la turbidez y extienden la vida de los componentes.
- Tubería de alta presión de acero inoxidable.
- Panel montado y línea de instrumentos que incluyen indicadores de flujo, indicadores de presión e indicadores de temperatura para un monitoreo efectivo del desarrollo del sistema.
- Monitor de calidad de agua, con botón selector que proporciona los TDS del agua de alimentación y agua producto, o porcentajes de sales retenidas, para el monitoreo exacto del desarrollo del sistema.

### 4.3 Características del modelo

Modelo	: LP-11
Capacidad nominal	: 9500 GPD
Recuperación	: 60 %
Motor	: 3 HP
Tubería agua alimentación	: 1 ½ “
Tubería agua producto	: 1 “
Tubería agua desecho	: ¾ “
Dimensiones	: 108”x30”x60”
Peso	: 1460 lbs.

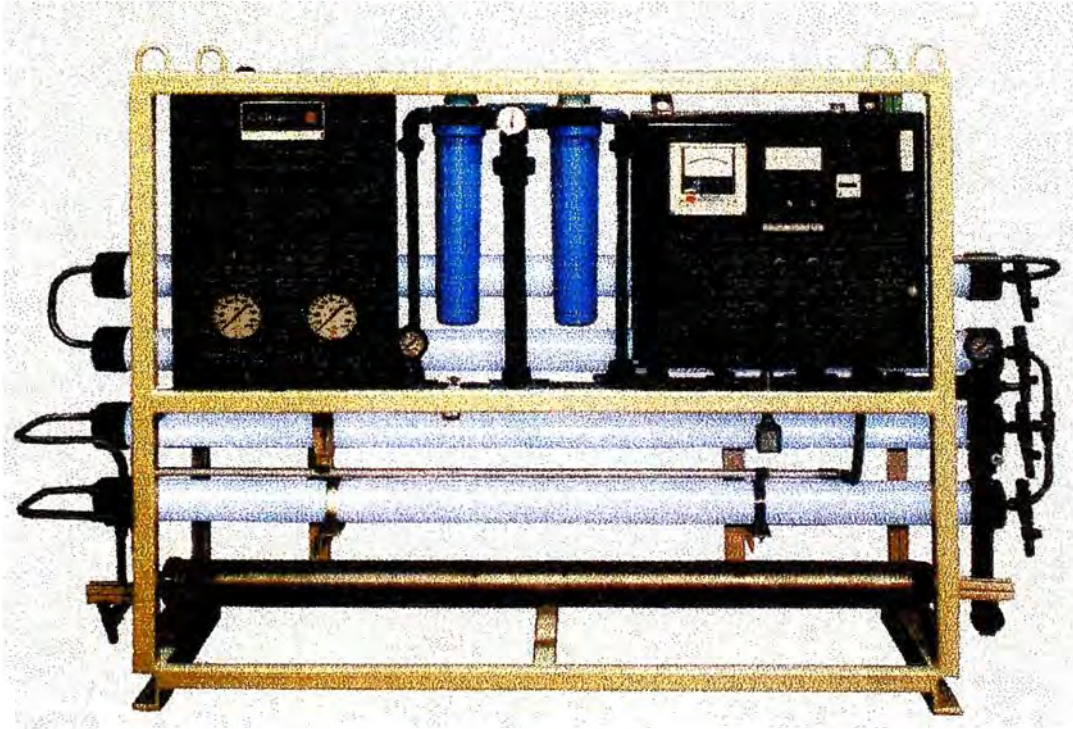
### 4.4 Características de los componentes (4)

#### 4.4.1 Componentes hidráulicos

##### 4.4.1.1 Válvula de cierre

El agua de alimentación ingresa al sistema por medio de una válvula de diafragma, la cual es normalmente cerrada y es accionada por un solenoide.

Cuando el sistema está cerrado, esta válvula evita que el agua fluya a través del sistema a la línea de presión.



**Fig. 4.1: Equipo de Osmosis Inversa Modelo LP-11**

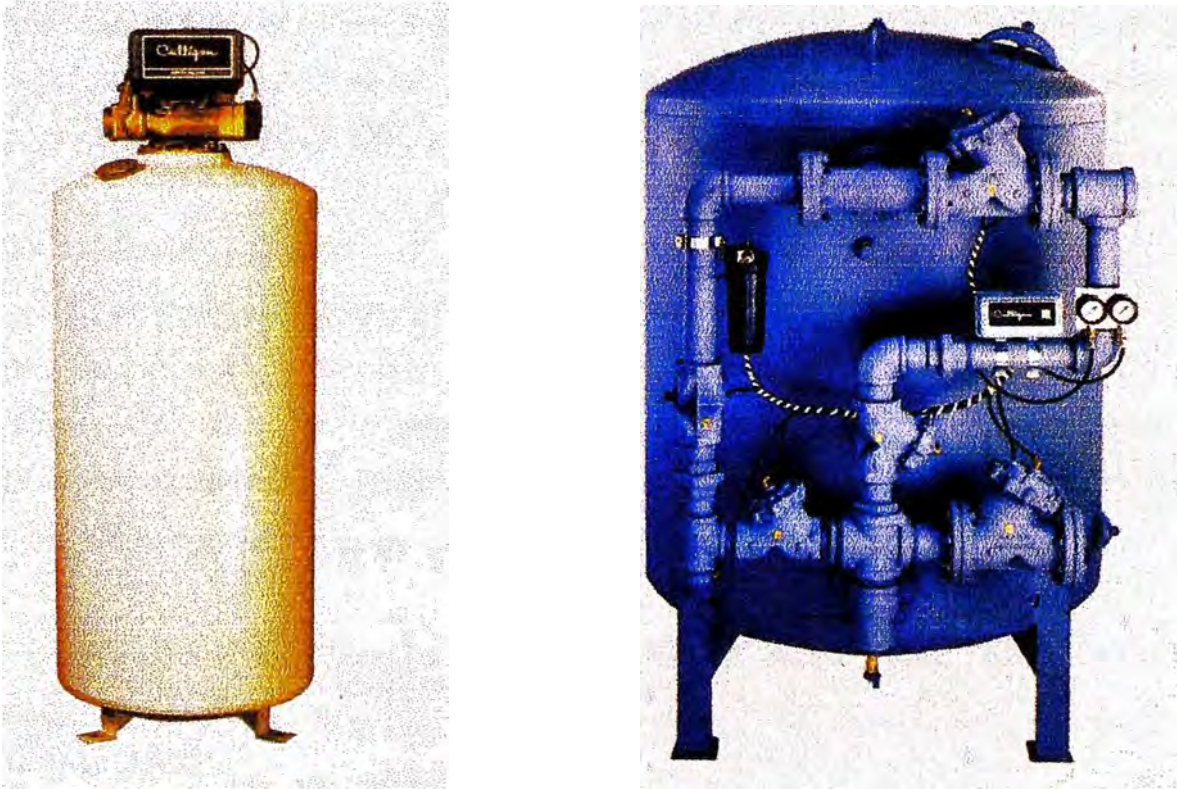
#### ***4.4.1.2 Puntos de dosificación de los aditivos***

Dos puertas de 0.5 pulgadas , se incluyen para permitir el fácil ingreso de los aditivos químicos a la línea de alimentación. El aditivo químico más comúnmente usado es el A-20, que es una mezcla especial de polímeros el cual evita la formación de costras, y ácido clorhídrico o sulfúrico usado opcionalmente para el control del pH del sistema.

#### ***4.4.1.3 Medidor de temperatura***

El medidor de temperatura , mide la temperatura del agua de alimentación en un rango de  $-40$  a  $160$  °F. La información de la temperatura del agua es usada para calcular el flujo de agua de producto bajo condiciones standard .





**Fig. 4.2. Filtro de lecho profundo HI-FLO 2**

#### ***4.4.1.4 Montaje del pre-filtro***

El agua de alimentación, fluye luego a través de dos filtros en paralelo el cual remueve partículas que dañarían otras partes del sistema. Cada montaje contiene un filtro de 20 pulgadas de longitud con una porosidad de 20 micrones.

Dos medidores de presión de 0-160 psig , están localizados en los lados interior y exterior de los filtros, para medir la caída de presión en los filtros, estos deben ser cambiados cuando la caída de presión supera los 15 psi, o menos de cada 750 horas de operación.

#### ***4.4.1.5 Válvula de muestreo del agua de alimentación***

Una válvula después del filtro, permite muestrear el agua de alimentación filtrada. Esta válvula tiene incorporado un acoplamiento para conectar el equipo

medidor S.D.I. (índice de densidad de suciedad). Esta prueba mide la tendencia que tiene el agua de alimentación de malograr los elementos del equipo RO. Si el S.D.I., excede el valor 3.0 (1.0 de productos de corrosión de fierro están presentes), el equipo de alimentación / filtración requiere un pretratamiento.

#### 4.4.1.6 *Bomba y motor*

El agua de alimentación, una vez filtrada es potenciada para operar a una presión por una bomba centrífuga multi-etapas, acoplado a un motor de 460 V. AC/60 Hz/3 fases. En las unidades de la serie “LP”, el montaje completo está hecho en una estructura de acero inoxidable en la que el motor es refrigerado con agua. Otros motores voltaje, están disponibles como opcionales.



Bomba centrífuga multietapa tipo booster.

**Fig. 4.3 Bomba centrífuga multietapa**

#### 4.4.1.7 *Válvula de estrangulación de la bomba*

Debido a que la potencia de salida de la bomba es más alta que la requerida inicialmente por el sistema, esta debe ser reducida por una válvula de estrangulamiento. La presión en ambos lados de la válvula son medidos por un manómetro y un medidor de presión del agua de alimentación. La información de la presión de la bomba se usa para conocer la condición de la bomba, mientras la información de la presión de alimentación, es usado para calcular el flujo de agua de producto bajo condiciones standard.

#### ***4.4.1.8 Montaje del modulo de osmosis inversa***

Los elementos del módulo de Osmosis inversa, consiste de bobinas en espiral, recubierto con fibras de plástico reforzado. La serie LP usa membranas formadas por películas delgadas, mientras que la serie LS, usa membranas de acetato de celulosa. La elección del tipo de membrana depende de la composición del agua de alimentación.

El agua de alimentación ingresa al sistema RO, donde es separada el agua producto (“permeada”) y agua de desecho (“concentrado”). Las válvulas están ubicadas en cada elemento tubular de membranas, para permitir la toma de muestra de agua que sale de cada elemento separador.

#### ***4.4.1.9 Componentes del agua de producto***

Después de que el agua producto de cada modulo es mezclado en un colector de PVC , la presión del producto es medida por un manómetro de 0-160 psig . El flujo total de producto es medido por un rotámetro montado en el panel.

#### ***4.4.1.10 Componentes del agua de desecho***

Dentro de la lista de unidades de la serie “L”, el agua de desecho del 1° módulo es usado como alimentación para el 2° modulo. Este proceso, llamado escalonamiento, conserva el agua sin sacrificar la calidad de esta. El flujo del agua de desecho que sale del último modulo es controlado por una válvula de estrangulamiento que está ubicado en el panel.

La válvula de estrangulamiento del agua de desecho, nunca debería ser cerrada completamente. El resultado es que la presión alta puede malograr los elementos del RO, y el bajo flujo del desecho puede llegar a causar el ensuciamiento de los elementos.

La presión del agua de desperdicio es medida por un manómetro de 0-1000 psig también montado en el panel. Por comparación de la presión en la

alimentación con la presión del desecho, se puede calcular la caída de presión a través del elemento. Un incremento en la caída de presión indica que en el elemento se está acumulando material sólido que daña el elemento. El flujo del agua de desecho es medida por un rotámetro

#### **4.4.1.11 Válvulas de retención**

Ambas salidas, tanto de las aguas de producto y desperdicio, tienen válvulas check para evitar el retorno del flujo de agua hacia el sistema RO. La válvula para toma de muestra está situada cerca de cada válvula check.

#### **4.4.2 Componentes del panel de control**

El tablero de control eléctrico usa un switch portafusibles para desconectar, el cual está conectado a una fuente de alimentación de 460 V, AC/60 HZ/3P. Esta alimentación es conectado al motor vía un arrancador con un térmico para protección de sobrecarga .

Los otros componentes del panel operan con alimentación de 110 V, AC/60 Hz/1P por medio de un transformador de 250 VA .La potencia de bajo voltaje está protegida por un fusible de 2 amperios

##### **4.4.2.1 Indicador de luces**

La parte frontal del panel contiene las siguientes luces indicadoras :

<b>Código</b>	<b>Color</b>	<b>Indicación</b>
LT-1	Blanco	Encendido
LT-2	Verde	Tanque de almacenamiento lleno
LT-3	Ambar	Presión de entrada baja.

La luz de encendido, LT-1, no enciende cuando no hay un voltaje bajo en la línea. Sin embargo, cuando se desee abrir la tapa del panel, debe desconectarse el switch que alimenta con tensión al tablero.

#### ***4.4.2.2 Monitor TDS***

El monitor TDS recibe la señal de la conductividad de la celda localizada en la tubería de alimentación y en la tubería del agua producto. El monitor tiene dos escalas de medida

<b>Medida</b>	<b>Rango</b>
% de Sal Rechazada	80-100 %
TDS alimentación	0-250 (x10) ppm
TDS en el producto	0-250 ppm

El monitor de TDS está energizado siempre que haya una tensión baja en el panel de control . El monitor tiene un registrador exterior y un reloj para control del aparato.

#### ***4.4.2.3 Monitor de tiempo transcurrido***

El panel cuenta con un contómetro del tiempo transcurrido, el cual muestra el tiempo transcurrido de funcionamiento del motor. Este tiempo puede ser usado para determinar los intervalos de servicio.

#### ***4.4.2.4 Interruptor de baja presión y alarma***

El interruptor de baja presión corta el sistema cuando la presión a la entrada de la bomba es menos de 10 psig. Una luz en el panel, se enciende indicando que existe una situación de baja presión.

Si el sistema se para debido a una baja presión a la entrada, se acciona una alarma . La alarma continúa sonando hasta presionar el botón , o cuando el interruptor de alimentación de tensión es apagado.

#### ***4.4.2.5 Relays de retardo***

Se usa un relay de retardo de tiempo , para prevenir al sistema de una interrupción o corte, debido a una condición transitoria de baja tensión , detectado por el interruptor de baja presión. El relay viene ajustado de fábrica a 1.6 seg. y se puede ajustar de 1.6 seg. a 16 seg.

Un segundo relay de retardo , permite a la válvula de corte abrir; pero permite a la bomba arrancar con un retardo de 1.6 a 16 seg. (viene regulada a 16 seg. de fábrica).

Este retardo permite que la presión de la línea alcance a la bomba antes de que esta arranque, controlando las oscilaciones y prolongando la vida de la bomba.

#### ***4.4.2.6 Interruptor de potencia***

En la posición “AUTO”, el interruptor de potencia hand-off / reset-auto produce un corte automáticamente, cuando la presión de entrada es baja o cuando el tanque de almacenamiento está lleno. En la posición “hand”, el sistema operará cuando el tanque de almacenamiento este lleno pero no cuando exista la condición de baja presión a la entrada.

La posición “Hand”, solo debería usarse para prevenir el rebose del tanque de almacenamiento.

Con el interruptor en la posición “Off / reset”, el sistema se interrumpirá y todas las alarmas y los relays de retardo de tiempo se resetearán. La luz de “power on” (potencia activada) queda encendida en cualquier posición en la que se encuentre el interruptor, para indicar que el tablero está energizado.

#### ***4.4.2.7 Relays del pretratamiento***

El panel de control contiene 2 relays para el pretratamiento, los cuales cortan el sistema cuando el pretratamiento está en regeneración, para prevenir que agua no tratada ingrese al sistema.

El sistema será cortado si el interruptor de potencia está en la posición en la posición “Hand”.

El panel de control, también está provisto de conexiones si se desea usar una bomba para dosificación de productos químicos y para un control de nivel opcional .

El control de nivel deberá ser capaz de manejar una carga de corriente de 2 amperios; la corriente total de tracción de la bomba de productos químicos, no deberá ser mayor de 0.33 amp.

#### ***4.4.2.8 Control de ph opcional***

Un controlador opcional de pH, se puede usar para la alimentación del ácido y prevenir la formación de costras de carbonato en las membranas del RO. El sistema incluye una bomba para alimentación de ácido, un medidor de pH y su respectiva celda, soluciones buffer, y un control para corte de alarma.

El sistema de control de pH no previene la formación de costras de sulfato, fluoruro, o sílice, para la cual se requiere el uso del aditivo A-20 en la línea de alimentación.

La sonda del medidor de pH envía una señal de bajo voltaje al monitor de pH, el cual aparece mostrado en un medidor de pH que posee una escala de 4-10 unidades .

La bomba del ácido es activada por un relay en el controlador, solo cuando el motor es activado. Un foco de luz roja se encuentra montado en el tablero y solo se prende cuando funciona la bomba que alimenta el ácido.

Si el pH del agua de alimentación es muy alto o muy bajo, un relay con retardo de tiempo hace funcionar una alarma (el relay , es regulable de 25.6 seg. a 256 seg). Este relay viene regulado de fábrica en 25.6 seg). Si el pH está todavía fuera del rango después de transcurrido el tiempo de retado, el sistema es cortado, suena una alarma y se enciende el foco de color ámbar, indicando que el pH ha caído.

La función ALARM/OFF del sistema de control del pH, no se activa si el switch de potencia está en la posición “HAND”.



**CAPITULO 5:**  
**EVALUACION ECONOMICA**

**5.1 Antecedentes**

El agua fuente de la empresa es de pozo a la que solamente se le realizaba un proceso de filtración con filtro de arena.

Las necesidades de consumo de agua deionizada en ese entonces (año 1993) eran de 30 m<sup>3</sup>/día (día de 24 horas).

Se disponían de 2 sistemas de desmineralización manual marca Rovic de 4 columnas cada uno, el diámetro promedio por columna era de 12", que trabajaban en serie.

Para el almacenaje de agua deionizada se disponía de una cisterna de 12m<sup>3</sup>, pero la proyección de almacenaje era de 24 a 30 m<sup>3</sup>.

El agua deionizada debía tener una resistividad mínima de 500,000 OHM/cm, esperando tener como máximo un contenido de sólidos disueltos totales de 1 ppm como CaCO<sub>3</sub>.

El análisis de agua efectuado por Sedapal arrojó el siguiente resultado

<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>
Ph	6.62
Turbidez	1.00 NTU
Conductividad	2537.00 micromhos-cm
Alcalinidad total	335.00 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Dureza total	2207.00 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Calcio	1757.50 ppm como CaCO <sub>3</sub>

Magnesio	442.80 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Cloruros	757.17 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Sulfatos	923.52 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Nitratos	10.036 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Sólidos Totales	2412.00 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Sólidos disueltos	2290.00 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Hierro	0.788 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Sodio	113.36 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Potasio	8.32 ppm como CaCO <sub>3</sub>

## 5.2 Evaluación

Los análisis efectuados por Sedapal a las muestras de agua de pozo, arrojaban resultados que indicaban que se trataba de un agua con elevado contenido de sales con predominio de sulfatos y cloruros de calcio y magnesio en menor proporción. Esta particularidad le daba un carácter fuertemente incrustante, haciéndola no adecuada en su utilización para sistemas de enfriamiento o de proceso u otros servicios industriales.

Para adecuar este tipo de agua dentro de los parámetros deseados (resistividad mínima de 500,000 ohm/cm), para proceso, era necesario recurrir a cualquiera de los siguientes sistemas de desmineralización:

### ***Doble deionización por intercambio Iónico***

Tomando en consideración el valor determinado de sólidos disueltos totales (2290 ppm), era materialmente imposible llegar a las cantidades deseadas (1 ppm), con un solo proceso de deionización que empleara columnas de intercambio catiónico – aniónico, debiéndose implementar un doble sistema de deionización en serie, de tal forma que en el primer sistema se obtuviera una reducción de los sólidos disueltos totales en un 99%; por lo tanto se esperaba

tener un efluente con un contenido aproximado de 30 ppm. El segundo sistema recibiría como agua de alimentación el efluente final de aproximadamente 0.3 ppm, con una resistividad de 1 200 000 ohm/cm.

### ***Sistema de reducción de Sólidos Mixto (Ósmosis Inversa, Deionización)***

En este sistema se consideraría la implementación de un sistema de ósmosis inversa que reduzca hasta un 98% el contenido de sólidos disueltos totales, de tal forma que tendrían como producto un agua con 45.8 ppm; esta agua alimentada a un sistema de deionización por intercambio iónico, arrojaría un efluente final de 0.229 que corresponde a una resistividad de 1 200 000 ohm/cm, encuadrando perfectamente dentro de los parámetros deseados.

Por el alto contenido de sólidos en suspensión, se tendría la necesidad de utilizar un pretratamiento por filtración de “lecho profundo”, afín de eliminar cualquier partícula en suspensión de hasta 10 micrones. La tecnología de filtración de lecho profundo se basa en diferentes estratos de diferente granulometría y peso específico (a menor granulometría mayor peso específico) que además de garantizar una retención de partículas de hasta 10 micrones, permite un considerable ahorro en el consumo de agua para efectos del retrolavado (aproximadamente 15 veces menos que un filtro convencional de arena), teniendo finalmente una ventaja adicional que su lecho filtrante es considerado no perecible, es decir, sin necesidad de recambio.

### **5.3 Alternativas de Solución**

De acuerdo a las consideraciones analizadas en la Evaluación, se consideró por optar la implementación de uno de los sistemas que se detallan :

### **5.3.1 Alternativa I : Sistema de Doble Deionización**

El Sistema de doble deionización estaría formado por los siguientes equipos

1. Deionizador Culligan automático, modelo AS-3084 que producirá agua con un contenido de sólidos de 30 ppm aproximadamente, con un ciclo de producción de cada 4 horas, el flujo de trabajo será de 11 GPM, el agua producto será almacenado en una cisterna de 5 m<sup>3</sup> de capacidad que cubre perfectamente el tiempo que estará en regeneración el equipo.
2. Deionizador Culligan automático, modelo DB-20 S que producirá agua con un contenido de sólidos de 0.3 ppm, con un ciclo de producción de 190 horas, el agua efluente se almacenará en una cisterna de 30 m<sup>3</sup> y de allí se alimentará al proceso.

Para la primera deionización, el consumo de soluciones regenerante es de 34 galones de ácido clorhídrico y 18 galones de soda cáustica por regeneración.

Como quiera que en un día de operación se debe llevar a cabo 3 regeneraciones, el consumo por día sería de

- 102 galones/día de HCl
- 54 galones/día de NaOH

El costo de los reactivos es aproximadamente de :

- HCl 1.09 US\$ / galón
- NaOH 2.03 US\$ / galón

Por lo tanto, el costo por regeneración sería de

• 102 galones de HCl	x US\$ 1.09	= US\$ 111.18
• 54 galones de NaOH	x US\$ 2.03	= US\$ 109.62
		-----
		US\$ 220.80 / día

COSTO MENSUAL = US\$ 6624,0

*Observación:*

Los Sistemas de deionización no son recomendables para “aguas-fuente”, con un contenido mayor de 800 ppm de sólidos disueltos totales, ya que el agua-producto no es de óptima calidad además de resultar muy oneroso por las grandes cantidades de consumo tanto de ácido como de soda (soluciones regenerante), además del tiempo de inoperatividad durante las regeneraciones.

**5.3.2 ALTERNATIVA II : Sistema Osmosis Inversa, Deionización**

El sistema considerado de ósmosis inversa y deionización contempló la implementación de

1. Un sistema de Osmosis Inversa, modelo LP-11 de trabajo continuo y que produciría un agua efluente de 45.4 ppm; esta agua puede ser conectada directamente a la siguiente etapa de deionización con un flujo de producción de 5.5 GPM.
2. Deionizador Culligan automático, modelo DB-20S que produciría un agua con contenido de sólidos de 0.9 ppm aproximadamente, con un ciclo de producción de 125 horas; el agua efluente se almacenará en una cisterna de 30 m3 aprox. y de allí será alimentada al proceso.

El gasto consumible en el Sistema de Osmosis Inversa está referido a un cilindro de solución anti-incrustante A-20 y aproximadamente 2 cartuchos de filtro pulidor mensualmente, lo que significa un costo aproximado de :

• Cartuchos	= US\$ 52.22
• Anti-incrustante A-20	= US\$ 215.00
<b>COSTO MENSUAL</b>	<b>= US\$ 267.22</b>

## 5.4 Costo de Equipos

### 5.4.1 Alternativa I

#### 1. *Filtro Culligan de lecho profundo automático, HI-FLO 2*

Modelo	PV-12 D
flujo normal	8 GPM
Caída de presión	2 psi
Flujo máximo	: 12 GPM
Caída de presión	4 psi
Diámetro tubería	1 ½"
Dimensiones	12" X 37"
Peso aproximado	222 lbs

- ***Precio Ex works Northbrook, Illinois : US\$ 1450.00***

#### 2. *Sistema Culligan de Deionizacion Automática, Serie Premier*

Modelo	ASB 3084 SPECIAL
Flujo nominal	9.8 GPM
Caída de presión	4 psi
Flujo nominal	50 GPM
Caída de presión	28 psi

Diámetro tubería	: 1 ½"
Resina catiónica	: 17 pies <sup>3</sup>
Resina aniónica	: 19 pies <sup>3</sup>
Espacio requerido	120" X 57" X 117"
Peso aproximado	5100 lbs

- ***Precio Ex works Northbrook, Illinois : US\$ 39260.00***

### ***3. Sistema Culligan de Deionizacion Automática***

Modelo	DB-20S
Código	00-443601
Flujo mínimo	3 GPM
Caída de presión	1 psi
Flujo máximo	15 GPM
Caída de presión	20 psi
Diámetro de tubería	1 "
Resina catiónica	6.5 pies <sup>3</sup>
Resina aniónica	6.5 pies <sup>3</sup>
Espacio requerido	44"X28"X77"
Peso aproximado	1100 lbs

- ***Precio Ex works Northbrook, Illinois : US\$ 12150.00***
- ***Total precio Ex works Northbrook, Illinois : US\$ 52860.00***
- ***Precio interno en Almacenes : US\$ 68506.56***

## 5.4.2 Alternativa II

### 1. *Filtro Culligan de Lecho Profundo Automático, HI-FLO 2*

Modelo	PV-16 D
Código	01-002077
Flujo normal	14 GPM
Caída de presión	3 psi
Flujo máximo	21 GPM
Caída de presión	7 psi
Diámetro tubería	1 ½"
Dimensiones	16" X 37"
Peso aproximado	410 lbs

- *Precio Ex works Northbrook, Illinois :* **US\$ 1780.00**

### 2. *Sistema Culligan de Osmosis Inversa Serie L*

Modelo	: LP-11
Código	: 00-9093-92
Capacidad nominal	9500 GPD
Recuperación	60 %
Motor	3 HP
Dimensiones	108" X 0 "X60"
Peso aproximado	1460 lbs

- *Precio Ex works Northbrook, Illinois :* **US\$ 27440.00**

### 3. *Estación de Limpieza para Sistema de Osmosis Inversa, Serie L, Modelo LP-11*

- *Precio Ex works Northbrook, Illinois:* **US\$ 4527.00**



**4. Lote de repuestos para la Planta RO, Mod. LP-11 estimado para tres años**

- **Precio Ex works Northbrook, Illinois : US\$2958.00**

**5. Consumible estimado para dos años de operación continua de la Planta RO, Serie L, Modelo LP-11.**

- **Precio Ex works Northbrook, Illinois : US\$ 3858.00**

**6. Sistema Culligan de Deionizacion Automática**

Modelo	DB-20S
Código	00-443601
Flujo mínimo	3 GPM
Caída de presión	1 psi
Flujo máximo	15 GPM
Caída de presión	20 psi
Diámetro de tubería	1 “
Resina catiónica	6.5 pies <sup>3</sup>
Resina aniónica	6.5 pies <sup>3</sup>
Espacio requerido	44”X28”X77”
Peso aproximado	1100 lbs

- **Precio Ex works Northbrook, Illinois : US\$ 12150.00**

- **Total precio Ex works Northbrook, Illinois US\$ 52713.00**

- **Precio interno en Almacenes : US\$ 68308.26**

## **5.5 Resultados obtenidos con la implementación del Sistema de Osmosis Inversa - Deionización**

Ver tabla 5.1

## **5.6 Ventajas y Aplicaciones del Sistema de Osmosis Inversa**

### ***5.6.1 Ventajas obtenidas***

Las ventajas obtenidas con la implementación de este Sistema de Tratamiento de Agua son las siguientes

1. Agua para proceso de alta calidad por la cual se obtienen productos con especificaciones técnicas que permiten competir en el mercado internacional.
2. Reducción de espacio y equipos; ventaja importante en lo que se refiere a distribución de Planta.
3. Disminución de operatividad de equipos. El equipo trabaja automáticamente; se evita la manipulación de productos químicos usados en los sistemas convencionales de deionización, la cual ocasiona riesgos en aspecto de seguridad; además de la inoperatividad de equipos durante las regeneraciones.
4. Agua para suministro (calderas) de óptima calidad, debido a que a partir del agua osmotizada se necesita de un simple tratamiento por ablandamiento (automático).
5. La mejora en la calidad del agua de los calderos repercutió notablemente en el ahorro energético y el tratamiento químico realizado la caldero. Esto se manifestó en la drástica disminución del sistema de purgas de 1 purga / hora a 0.5 purga / día. La disminución trajo como consecuencia un alto ahorro en combustible y productos químicos del tratamiento químico de calderos (se

elimina en cada purga), además de mantener la presión del caldero homogénea.

6. La disminución de las purgas también tuvo como consecuencia la eliminación del sistema de enfriamiento del agua que se descarga, teniendo en cuenta las exigencias legales respecto a temperatura de agua residual ( $< 35^{\circ}\text{C}$ ).
7. El retorno de la inversión , se vio reflejado notablemente en la disminución de los costos variables como consumo de productos químicos utilizados en regeneración de sistemas de deionización usuales, productos químicos para tratamiento de calderos, consumo de combustible, además de mano de obra.

### ***5.6.2 Otras aplicaciones de la Osmosis Inversa (5)***

Se puede agrupar este acápite en dos grandes secciones:

#### ***5.5.2.1 Tratamiento de soluciones con alta presión osmótica***

Es decir, presiones osmóticas superiores a 10 bar, tal como se presentan en aguas con alto contenido de sólidos disueltos, ejemplo, agua de mar y jugos azucarados.

En estos casos se utilizan equipos con membranas a base de acetato de celulosa.

#### ***Usos Frecuentes :***

1. Obtención de agua potable
  - 1.1 A partir de agua de mar (aprox. 35000 ppm)
  - 1.2 A partir de agua salobres ( $> 10000$  ppm)
2. Concentración de jugos azucarados

Jugo de uvas, manzanas, naranja, etc.

3. Concentración de diversos líquidos alimenticios
  - 3.1 Enriquecimiento de proteínas
  - 3.2 Suero de leche
  - 3.3 Leche
  - 3.4 Cerveza y vino
  - 3.5 Café
  
4. Recuperación de productos de agua de procesos
  - 4.1 Metales preciosos y valiosos en residuales de Galvanoplastia (oro, plata, platino, níquel, cromo, zinc, aluminio, cadmio, etc.), lo mismo de procesos fotográficos.
  - 4.2 Substancias de gran importancia (elementos radioactivos, aceites minerales, alcohol polivinílico, tintes, etc.)
  
5. Eliminación de substancias en las aguas residuales
  - 5.1 Disminución del total de sólidos disueltos
  - 5.2 Disminución de la DBO y del COD
  - 5.3 Detergentes y tensoactivos
  - 5.4 Pesticidas
  - 5.5 Elementos radioactivos

#### ***5.5.2.2 Tratamiento de soluciones con baja presión osmótica***

Es decir, menores de 10 bar. Para ello se utiliza equipos con membranas poliamídicas de fibras huecas.

#### ***Usos más comunes:***

1. Obtención de agua potable a partir de aguas salobres (< 1000 ppm)

- 1.1 Agua de uso general urbano
  - 1.2 Agua potable de mesa
2. Producción de aguas industriales a partir de aguas superficiales (duras) o aguas salobres.
- 2.1 Para equipos generadores de vapor; calderas de baja y alta presión.
  - 2.2 Para sistemas de enfriamiento (ej. torres de enfriamiento)
  - 2.3 Aguas desmineralizadas de altas purezas, sin o en combinación con desionizadores, para laboratorios, electrónica, etc.
3. Fabricación de agua de proceso (requerimientos especiales)
- 3.1 Agua para alimentos (embutidos, envasadoras, deshidratadoras)
  - 3.2 Agua para uso médico y farmacéutico, tales como: Dieta de bajo sodio, separación de virus, separación de enzimas, separación de componentes en fluidos del cuerpo, para riñones artificiales. Otros usos que requieren agua biológica y bacteriológicamente pura.
  - 3.3 Todo tipo de agua procesal industrial, especialmente diseñada (industria textil, electrónica, etc.)
  - 3.4 Agua para uso general de enjuagues industriales
  - 3.5 Agua para usos generales de dilución.

**TABLA 5.1 : Resultados obtenidos Sistema Osmosis Inversa - Deionización**

FECHA		27/10/93	02/12/93	15/12/93	30/12/93		15/06/02	25/06/02	10/07/02	15/07/02	MIN	MAX
°T agua Ingreso	° C	22	22	23	23		25	25	25	25		
Presión ingreso filtro cartucho	psi	35	34	35	34		54	49	44	45	35	55
Presión salida filtro cartucho	psi	32	24	30	30		52	48	30	30	35	55
Presión bomba	psi	310	300	300	300		285	290	290	285	250	320
Presión ingreso membranas	psi	210	165	270	180		195	200	190	195	150	250
TDS agua ingreso RO	ppm	1160	1160	1150	1151		1200	1200	1200	1200		
TDS agua producto	ppm	18	18	19	18		18	18	18	18		
Retención de sales	%	98.4	98.4	98.3	98.4		98.5	98.5	98.5	98.5		
Flujo agua producto	GPM	8.1	8.3	7.5	8.3		10.0	10.1	10.8	10.0	8.5	12.5
Flujo agua rechazo	GPM	8.3	10	9.4	10.3		8.6	8.7	8.6	8.6	8	10.5
Flujo producto + rechazo	GPM	16.4	18.3	16.9	18.6		18.6	18.8	19.4	18.6		
Recuperación (Recovery)	%	49.4	45.4	44.4	44.6		53.8	53.7	55.7	53.8		
Conductividad agua deionizada	ohm <sup>-1</sup>	500	500	500	500		451	475	505	480	500	
TDS agua deionizada	ppm	1.0	1.0	1.0	1.0		1.5	1.3	1.0	1.3		5

### ***CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES***

1. El sistema de tratamiento por Osmosis Inversa es un alternativa altamente rentable para la obtención de agua de proceso de óptima calidad, en combinación con un sistema de deionización.
2. Su aplicación se justifica teniendo en cuenta la naturaleza del agua fuente, así como las necesidades del agua producto.
3. Su operación disminuye notablemente los costos operativos como mano de obra, y costos variables de productos químicos; en contraposición con sistemas de deionización convencionales.
4. La Osmosis Inversa es un procedimiento que ofrece grandes posibilidades en las múltiples actividades humanas, tanto para uso urbano como agrario, para uso industrial como doméstico; no solo en la purificación del agua sino también en el campo de la concentración y recuperación de productos diversos.

**BIBLIOGRAFIA**

1. Agua Crystal, 2002, *Osmosis Inversa*,  
[www.aguacrystal.com.mx/osmosis](http://www.aguacrystal.com.mx/osmosis) ( p. 13)
2. Medina San Juan J.A., *Desalación de Aguas Salobres y de Mar. Osmosis Inversa*, Ed. Mundi-Prensa, Madrid-España, 1999. ( pp. 13, 17, 18, 19, 27, 33, 35, 39, 54)
3. Nalco Chemical Co., *Manual del Agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*, tomo I, Ed. Mc Graw-Hill, México, 1985. ( p. 54)
4. Culligan, *Aqua-Cleer Series L. Water Treatment Systems. Installation and Operating Instruccions*; Culligan International Company, USA, 1986. (p. 64).
5. Vergara Yayon F., *Tratamiento de Aguas Industriales*, Ed. KAVIESA, Lima-Perú, 1984. (p. 83)