

04.73.12

389

Capítulo 5

PROBLEMAS DE CORROSION EN DESALINIZACION  
DE AGUA DE MAR

C.J.Semino (CNEA)  
S.P.B.de Wexler (CNEA)

Primera parte:

Estado actual del problema en la Argentina.



## I. SUMINISTRO DE AGUA POTABLE

### I.1 Descripción del problema

En los últimos años se está considerando en todo el mundo la creciente necesidad de agua potable. Muchos países, aún aquellos especialmente favorecidos por la naturaleza, están contemplando con inquietud su posición en cuanto al abastecimiento de agua potable para los años venideros. Esto es debido al crecimiento de la población, al aumento de su nivel de vida y a la creciente industrialización.

A medida que un país va alcanzando mayores niveles de desarrollo, el consumo de agua "per cápita" es cada vez mayor. Cuando las fuentes locales de agua potable han sido totalmente explotadas, las necesidades suplementarias de agua deben buscarse en lugares cada vez más remotos, lo que incrementa continuamente el costo del agua.

En muchos lugares del mundo la situación es aún más grave ya que las fuentes naturales de agua potable no son suficientes para lograr condiciones de vida adecuada. Se estima que alrededor del 60% de la superficie terrestre es tierra "seca", clasificándose como zonas extremadamente áridas, áridas, o semiáridas, Fig. 1. Como se ve, gran parte de estas zonas están situadas cerca de la costa marina o poseen fuentes de agua salobre y su desarrollo dependerá de las posibilidades de obtener agua potable al costo más bajo, mediante la desalinización. Estas zonas áridas son de muy baja densidad de población, a pesar de que se estima que ésta se incrementará al doble para el año 2000 (41).

En el caso particular de los países latinoamericanos, la Argentina es uno de los países más afectados, por cuanto, tal como veremos más adelante, aproximadamente la mitad de su superficie es árida. Esto nos coloca en situación de desventaja frente a países como Brasil, que no sufren tal deficiencia.

Otras zonas que sufren escasez de agua potable son las zonas superpobladas o zonas que dependen de lluvias estacionales, etc. También se mencionan casos de islas (84) (por ejemplo: islas griegas, Bermudas, etc.) donde es necesario importar el agua potable.

Todo esto explica el gran interés que existe mundialmente en el desarrollo de métodos de desalinización que permitan reducir los costos y aumentar la eficiencia. Se explica también el interés en desarrollar materiales resistentes a la corrosión y que a la vez sean más económicos: EL 40% DEL COSTO DE UNA PLANTA DE DESTILACION CORRESPONDE A LAS TUBERIAS DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR (90).

El método de desalinización de agua de mar por destilación es conocido desde hace mucho tiempo. Se lo empleó a bordo de buques desde que se generalizó la propulsión a vapor, pero incluso en el siglo XVII ya se habían

realizado experiencias de desalinización en barcos de vela de la Armada Británica (86).

La idea básica es eliminar la sal del agua y para ello se emplean diferentes procesos químicos y físicos, tales como: destilación, congelación, intercambio iónico, electrodiálisis, etc. Todos ellos requieren fuentes de energía, ya que el mínimo de energía requerida para un proceso teóricamente reversible es de 2,65 kWh por cada 1000 galones ( $3,8 \text{ m}^3$ ) de agua desalinizada a partir de agua de mar.

Los requerimientos reales de energía son mucho mayores por problemas de ineficiencia térmica. El costo actual del agua desalinizada está determinado por el costo de producción de la energía necesaria y por la eficiencia de los métodos de desalinización utilizados. Hace 10 años aproximadamente, el agua desalinizada costaba 1,40 dólares cada 1000 galones ( $3,8 \text{ m}^3$ ). Hoy en día, para plantas de 1 millón de galones ( $3800 \text{ m}^3$ ) diarios, se bajó el costo a 1 dólar cada 1000 galones ( $3,8 \text{ m}^3$ ) y se calcula que para plantas de 100 millones de galones ( $380.000 \text{ m}^3$ ) por día el costo será inferior a 35 centavos de dólar cada 1000 galones ( $3,8 \text{ m}^3$ ) (61).

El problema actual es, como ya dijimos, obtener agua potable al menor costo posible, habiéndose encontrado que las plantas de doble propósito (es decir, que suministran energía eléctrica y agua desalinizada) son las más económicas (41,28). En general, la escasez de agua potable es el principal factor limitativo en el desarrollo de la economía y, por ello, la instalación de plantas desalinizadoras está en fuerte expansión en los últimos años: entre 1965 y 1967 hubo una tasa de crecimiento del 35% / año y se calcula, en promedio, que el incremento para la década 1965-1975 corresponderá al 20% / año (10). La Fig. 2 (56) muestra la distribución de la mayoría de las plantas desalinizadoras, de las que se tiene conocimiento en la literatura, que operan en el mundo, con una producción mayor que 250.000 galones / día ( $950 \text{ m}^3$  / día).

El uso de agua se puede clasificar comercialmente en: agua para uso doméstico, municipal, industrial y para riego. Actualmente, la mayoría de las plantas desalinizadoras se emplean para uso doméstico y, en gran parte, para uso industrial. Aún no es posible usar agua desalinizada para riego por el elevado costo. Según el contenido de sales, el agua se clasifica en: potable ( $< 500 \text{ ppm.}$ ), salobre ( $\leq 10.000 \text{ ppm.}$ ) y de mar (aproximadamente  $35.000 \text{ ppm.}$ ) (41).

A continuación se da una tabla de contenido máximo de sales para diferentes usos (41).





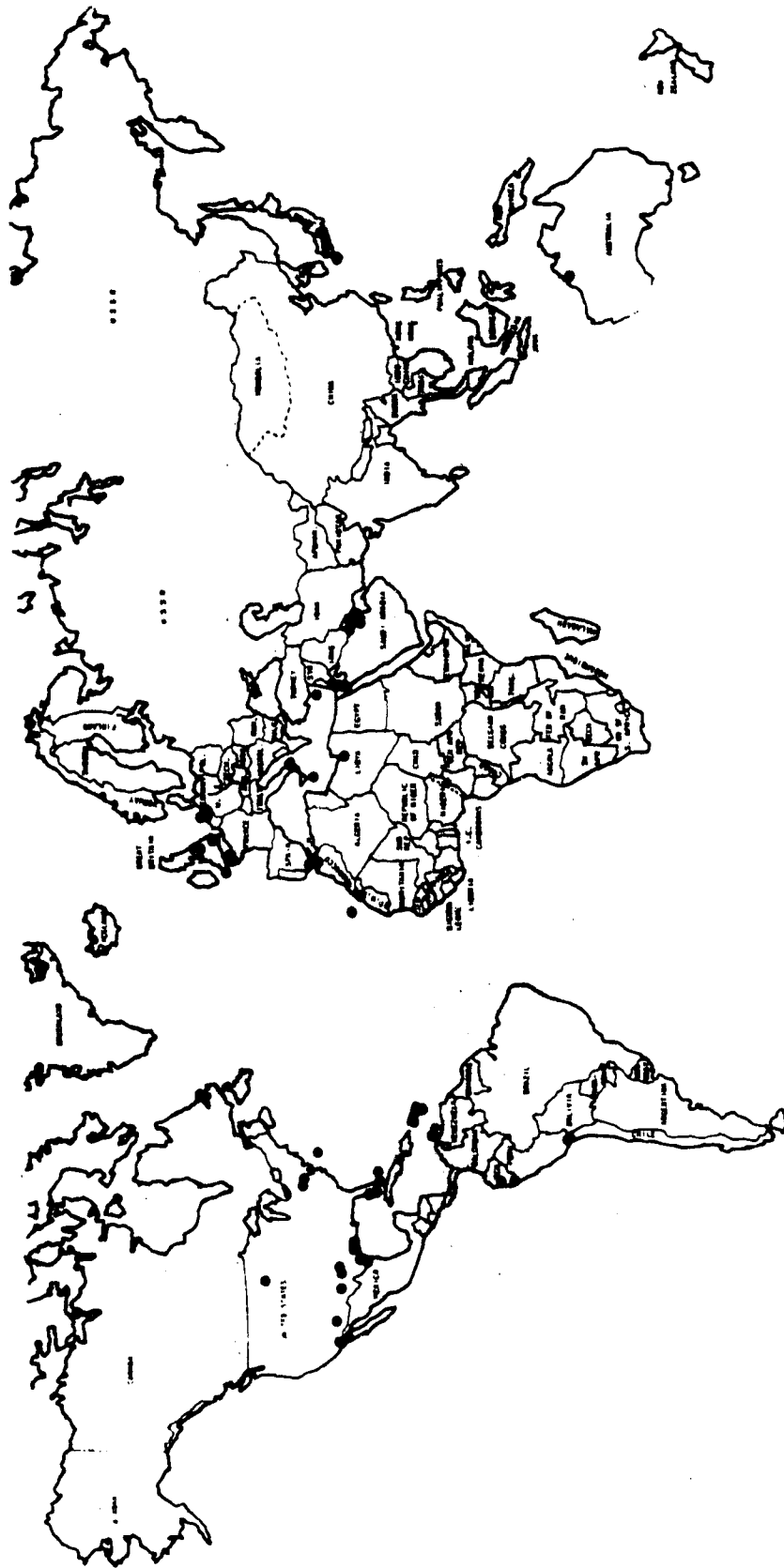


Figura 2.

Localización geográfica de las plantas desalinizadoras en servicio, con capacidad superior a los  $900 \text{ m}^3/\text{día}$ . (56).



## CONTENIDOS ADMISIBLES DE SAL EN EL AGUA

Usos	Máxima cantidad (ppm.)
Calderas de altas presiones	10
Consumo humano	500
Irrigación	500 a 1000
Otros usos	2000

I.2 Necesidades de agua potable en la Argentina

En la Argentina existen extensas áreas con graves problemas de escasez de agua. La mitad de la superficie del país tiene un promedio anual de lluvia inferior a 500 mm (68) como se puede ver en la Fig. 3. Un total de alrededor de 1.500.000 km<sup>2</sup> es considerada zona árida y prácticamente despoblada, solamente interrumpida por pequeñas zonas fértiles logradas gracias a perforaciones (para obtener aguas subterráneas) y represas.

Existen tres zonas principales de escasez de agua (84). La primera, situada en el noreste, y la segunda que corresponde a una zona central, pertenecen a la misma formación geológica: un sedimento cuaternario que contiene yacimientos acuíferos cuyos espesores varían entre unos pocos metros y hasta 60 metros de espesor. Estos depósitos, en mayor o menor grado, están siendo explotados en la actualidad, y se considera que en un futuro no muy lejano se agotarán estas reservas de agua a menos que se encuentre otra fuente alternativa de agua. Existen también depósitos de aguas salobres (que contienen entre 3000 y 4000 ppm de sales) y la relación es de 4:1 de agua dulce a salobre. En una capa inferior terciaria existen, a 1000m de profundidad, reservas de aguas salobres de más alto contenido en sales. Con respecto a aguas superficiales, estas zonas tienen escasos ríos, de muy pequeño caudal, que en verano llegan a secarse o a aumentar mucho su salinidad.

En la segunda área existen numerosos núcleos de poblaciones, de entre 30.000 y 40.000 habitantes, que sufren serios problemas de abastecimiento de agua y, además, la falta de agua dulce es una de las principales tra-

bas para el desarrollo industrial, ya que estas zonas están bien abastecidas por oleoductos y gasoductos.

La tercera zona corresponde al sur argentino, especialmente la gran zona costera que comprende parte de la provincia de Buenos Aires, Río Negro, Chubut y la Patagonia.

Argentina tiene 2.580 km. de costa, sin contar el estuario del Río de la Plata, y el océano es una fuente potencial de agua que, si fuera posible explotar a bajo costo mediante grandes plantas desalinizadoras, permitiría el desarrollo de nuevas poblaciones y un impulso a la industrialización ya que, en esta zona también, existen oleoductos y gasoductos, que provienen de Comodoro Rivadavia, y una gran riqueza minera (minerales de hierro en Sierra Grande, sal común, cobre, wolframio, carbonato de calcio, manganeso etc.). Además hay buenas posibilidades de instalación de grandes puertos (Puerto Madryn, San Antonio Oeste, etc.) (84).

Existen otros problemas de agua potable que se dan en los grandes centros poblados e industriales de la costa: ya hay problemas de abastecimiento en Mar del Plata, Bahía Blanca, etc.

### I.3 Trabajos sobre desalinización realizados en nuestro país

#### I.3.a Estudios de factibilidad

Existe un trabajo publicado por la U.N. sobre desalinización de aguas en países subdesarrollados (1964) (84), donde hay un estudio detallado de la Argentina y de la factibilidad de obtener agua potable por desalinización.

Posteriormente se realizó un estudio en la Facultad de Ingeniería de la U.N.B.A., sobre posibilidades de desalinización en la Argentina. El mismo fue presentado a la Conferencia Internacional de Agua para la Paz (Washington 1967) (65).

En 1969, en la Universidad de Bahía Blanca, Planta Piloto de Ingeniería Química, se hizo un estudio (70), encargado por la Municipalidad de Bahía Blanca, tendiente a determinar la posibilidad de colocación de una planta de desalinización para abastecer a dicha ciudad. En ese trabajo se aconsejaba la instalación de una planta desalinizadora dual, con combustible nuclear y con evaporadores "flash" de etapas múltiples.

Visto el gran avance logrado en los últimos años en técnicas de desalinización, así como las importantes reducciones en el costo del agua producida, se hace necesaria la realización de un estudio actualizado de factibilidad de instalación de plantas de desalinización en nuestro país. Tal como viéramos en la sección I.1, el agua potable obtenida por desalinización no puede ser económicamente utilizada en agricultura, sin embargo los costos de producción son competitivos con otros métodos usuales, cuando se trata

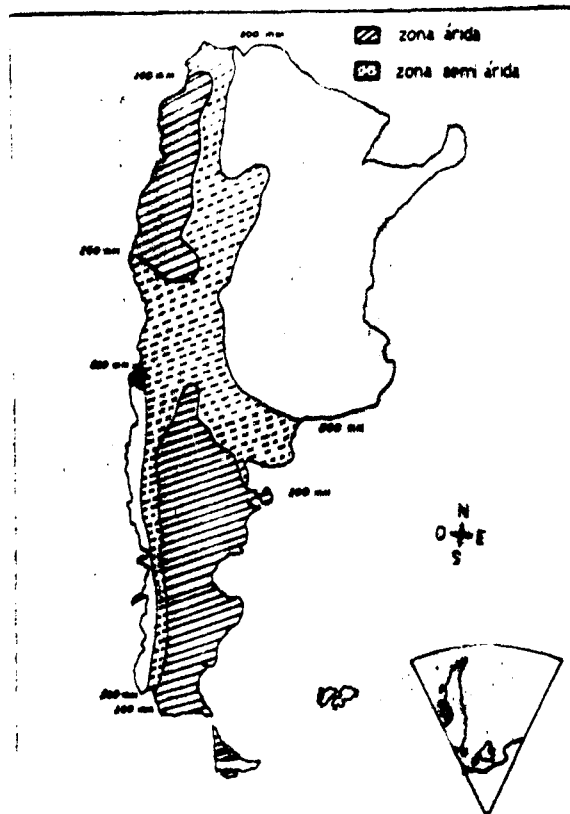


Figura 3.  
Mapa de precipitaciones en la Argentina. (68).

Zona árida  $\leq$  200mm./año.  
Zona semiárida  $\leq$  500mm./año.



de suministro para fines urbanos o industriales.

### I.3.b. Ensayos de nuevos métodos de desalinización

En la Facultad de Ingeniería de la U.N.B.A. (67), se efectuó una investigación teórica y experimental sobre destiladores solares. Se instalaron dos destiladores en Buenos Aires, con cubierta de vidrio, otro en la provincia de San Juan, con cubierta plástica y también se construyó un destilador de 25m<sup>2</sup> en Desaguadero (provincia de Mendoza).

Un informe de dicho trabajo fue elevado al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, en 1968. Los autores destacan que los resultados fueron satisfactorios y que dichos destiladores podrían emplearse para pequeños consumos (escuelas, pequeñas comunidades, etc.) en zonas del país donde las condiciones climáticas fuesen favorables. En la Facultad de Ciencias Exactas de la U.N.B.A. se está estudiando el método de desalinización por destilación "flash" por combustión sumergida (6). En la Universidad de Bahía Blanca, Planta Piloto de Ingeniería Química, (71), se está estudiando el mecanismo de la condensación directa sobre un chorro laminar de fluidodinámica definida, con el objeto de determinar el coeficiente de transferencia en distintas condiciones operativas.

En junio de 1969 el Servicio Nacional de Agua Potable y Saneamiento Rural dependiente de la Subsecretaría de Recursos Hídricos realizó una experiencia sobre desalinización de aguas duras por electrodiálisis. Para ello se utilizó un equipo comercial, y los resultados fueron publicados en Saneamiento (15\*). Se concluye que este método de desalinización no es económicamente accesible para las localidades rurales dentro de las cuales desarrolla su actividad el S.N. de A.P. y S.R. este método sería variable para poblaciones urbanas.

### I.3.c Materiales resistentes a la corrosión

En el Departamento de Metalurgia de la C.N.E.A. se formó en 1967 un grupo de investigación que se dedicó al estudio del ataque localizado de metales en medios acuosos, en particular medios que contienen iones cloruro. Los trabajos realizados tienen aplicación directa en la selección y desarrollo de materiales resistentes, en particular para aquellos componentes de plantas de desalinización donde se requiere el uso de metales sin recubrimientos protectores, como por ejemplo en los intercambiadores de calor.

Se estudiaron principalmente los siguientes materiales:

Aluminio y sus aleaciones (35, 23, 24, 36, 38)

Aceros de alta resistencia (37, 73)

Circonio y sus aleaciones (20)

Cinc y cadmio (4)

Acero inoxidable en cloruro de sodio acidificado con sulfúrico (21).

Actualmente se encuentran en desarrollo trabajos sobre efectos de la temperatura del medio corrosivo (21), influencia de la concentración de aleantes (55, 92, 5), segregación de soluto en estructuras de solidificación (93), y mecanismos de corrosión en rendijas (89).

Si bien no se conocen en el país trabajos sobre recubrimientos orgánicos para plantas de desalinización, se considera que sería de gran utilidad la experiencia acumulada sobre recubrimientos protectores para agua de mar en el laboratorio de pinturas del LEMIT (Ver Capítulo 3).

En cuanto a recubrimientos inorgánicos, es importante mencionar el trabajo realizado en C.I.T.E.F.A. sobre el efecto de la temperatura en la resistencia a la corrosión de aceros galvanizados.

Capítulo 5

PROBLEMAS DE CORROSION EN DESALINIZACION  
DE AGUA DE MAR

C.J.Semino (CNEA)  
S.P.B.de Wexler (CNEA)

Segunda parte:

Métodos de desalinización.  
Estado actual de la desalinización.  
Materiales utilizados.  
Bibliografía.



## II. METODOS DE DESALINIZACION

Los métodos de conversión de aguas salinas se pueden clasificar en base al tipo de energía que utilizan, en:

- a) Los que requieren energía térmica: destilación.
- b) Los que utilizan energía eléctrica: electrodiálisis.
- c) Los que necesitan energía mecánica: destilación por compresión del vapor, congelación y ósmosis inversa.
- d) Los que utilizan energía solar.

### II.1 Métodos de desalinización en uso actual

Los métodos más utilizados en el presente para obtener agua potable a partir de aguas salinas son: destilación "flash" en etapas múltiples (MSF), destilación por compresión del vapor (VC), electrodiálisis (ED), y evaporación por tubo vertical (VTE). También se utiliza el método de destilación por tubo sumergido (STD). Con respecto a este último método, en la literatura (85,18) se hace mención a su bajo rendimiento y, por lo tanto, no nos referiremos a él.

A continuación se describirán brevemente cada uno de estos métodos:

#### II.1.a Destilación "flash" en etapas múltiples (MSF)

En la Fig. 4 (86) se da un esquema simple del proceso de destilación "flash" por etapas múltiples. El agua de mar caliente se introduce en un recipiente cerrado que se mantiene a una presión inferior a la tensión de vapor de la misma. Una porción del agua se evapora y es condensada en la parte superior del recipiente y recogida en una bandeja. A fin de recuperar el calor gastado en evaporar el agua, se usa agua de mar fría en los condensadores, la cual va aumentando su temperatura al pasar de un recipiente a otro.

Para mejorar aún más la eficiencia se conectan varios recipientes, o etapas, entre sí. De este modo la temperatura del agua va aumentando al pasar de un recipiente a otro. Como la temperatura de la salmuera va disminuyendo al pasar de una etapa a otra, es necesario que la presión en las mismas también vaya disminuyendo, a fin de asegurar la continuidad del proceso de evaporación.

La máxima temperatura operativa está limitada únicamente por el riesgo de formación de incrustaciones alcalinas y cálcicas sobre los intercambiadores de calor.

Hasta el momento, este proceso ha demostrado ser el más seguro y satisfactorio para la potabilización del agua de mar en grandes cantidades y en forma relativamente económica. Actualmente se está diseñando una planta en California (EE.UU) que proveerá 150 millones de galones / día (550.000m<sup>3</sup>

/ día) de agua potable (28).

### II.1.b Destilación por compresión del vapor

Este sistema se basa en el hecho de que cuando comprimimos el vapor aumenta su temperatura. Por lo tanto, el método consiste en comprimir el vapor proveniente de la evaporación del agua salina y condensarlo en un intercambiador ubicado en el mismo evaporador; el calor desprendido se utiliza para producir la evaporación del agua salina.

Si bien este método de compresión del vapor exige un bajo consumo de energía, ésta es generalmente de un tipo costoso (electricidad). Además, es necesario elevar a unos 120°C la temperatura del agua salina de alimentación. Este proceso generalmente se utiliza para plantas pequeñas ( $< 50.000$  galones / día =  $190\text{m}^3$  / día) con resultados satisfactorios, aunque se están diseñando plantas desalinizadoras de este tipo con una capacidad de producción de 250 millones de galones / día ( $900.000\text{ m}^3$  / día) (75).

### II.1.c Electrodiálisis

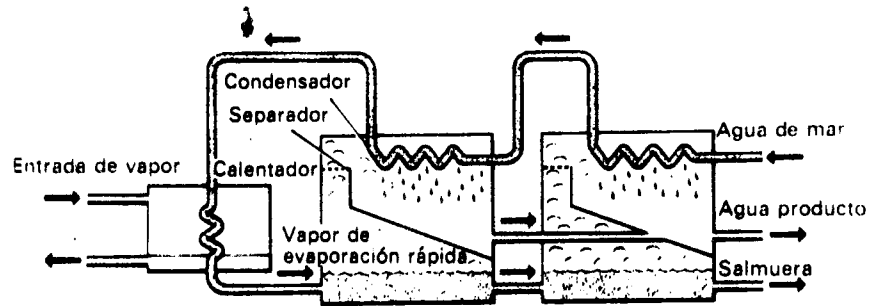
La producción de agua potable a partir de aguas salobres por electrodiálisis está en el 4º. lugar en la lista de procesos de desalinización en uso actual en términos de número de plantas y capacidad total de plantas (56).

Este proceso consiste en reducir la salinidad mediante la difusión a través de membranas, de los iones presentes en el agua bajo la influencia de un campo eléctrico inducido por electrodos. Estos electrodos están separados por medio de membranas especiales, alternándose las membranas permeables a los cationes con las permeables a los aniones, con lo que disminuirá la concentración de sales en el agua contenida entre estos pares de membranas. Esto puede verse diagramado en la Fig. 5 (56).

Multiplicando el número de pares de membranas situadas entre dos electrodos y colocando dos sistemas de colectores para recoger el agua dulce y la salmuera, se dispondrá de un equipo de electrodiálisis.

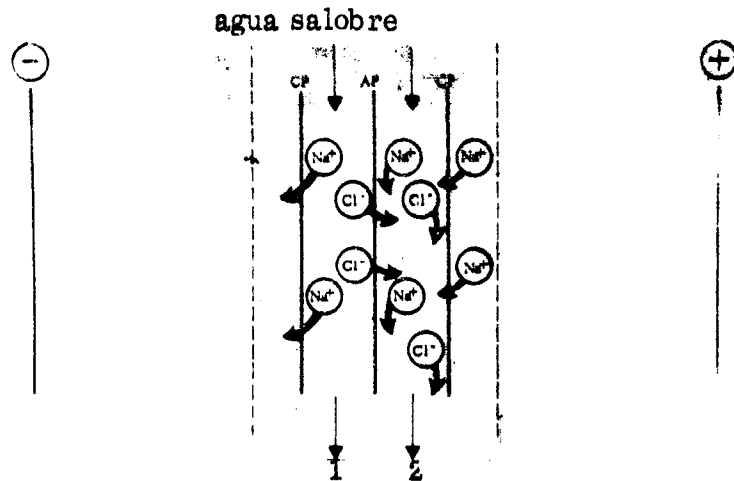
Como el consumo energético es proporcional a la salinidad del agua, la electrodiálisis resulta más económica cuando el agua de alimentación no contiene más de 10.000 ppm de sólidos disueltos (agua salobre) y más comúnmente se usa para contenidos entre 1000 y 2000 ppm de sales, obteniéndose un agua producto que contiene entre 200 y 750 ppm.

La capacidad de las plantas varía entre 58.000 y 1.200.000 galones / día ( $220$  a  $4.500\text{ m}^3$  / día). Los ánodos se construyen en grafito, acero inoxidable 316, titanio y tantalio platinizados. Los cátodos son de acero inoxidable o titanio platinizado. El mayor costo de mantenimiento se debe a ruptura y reemplazo de las membranas.



**Destilación rápida pluriestápica**

**Figura 4.**  
**Esquema simplificado del sistema de evaporación "flash" en etapas múltiples (86).**



**Figura 5.**  
**Principio de funcionamiento de los equipos de electrodiálisis.**  
**(1) Agua Potable,**  
**(2) Salmuera,**  
**CP: Membrana permeable a cationes,**  
**AP: Membrana permeable a los aniones.**



#### II.1.d Evaporación por tubo vertical (VTE)

Este método ocupa el segundo lugar respecto al volúmen de producción de agua potable en el mundo. La Office of Saline Water (O.S.W.) (56), da cuenta de una producción de 54,4 millones de galones /día (200.000m<sup>3</sup>/día) para un total de 96 plantas VTE, comparados con los 146,3 millones de galones /día ( 550.000 m<sup>3</sup> /día) producidos por 229 plantas MSF. La Fig.6 muestra un esquema simplificado del proceso (56).

El método consiste en hacer circular agua de mar a través de tubos verticales, calentados externamente por una corriente de vapor caliente. El proceso se hace en etapas múltiples, usándose el vapor obtenido de la primera etapa para el calentamiento de la subsiguiente y, por último, se condensa el vapor. La circulación de agua de mar puede ser por convección natural (por diferencias de temperaturas) o forzada. Hay dos tipos fundamentales de unidades VTE: el de película ascendente, donde el agua de mar asciende por los tubos verticales y el de película descendente, donde el agua de mar cae por las paredes internas de los tubos.

Los materiales utilizados, con pocas excepciones, son los mismos que los de las plantas MSF y el comportamiento es muy similar.

#### II.1.e Osmosis inversa (RO)

Cuando una membrana semipermeable separa agua dulce de agua salada tendremos, a presión atmosférica, un flujo de agua hacia la zona de agua salada, hasta igualar las concentraciones. Si se aplica una presión que exceda la presión osmótica del lado del agua salada, el flujo se invertirá y tendremos pasaje de agua hacia el compartimiento de agua dulce. A mayor concentración de sales, mayor presión requerida para desalinizar y más crítica será la membrana a utilizar. Por esta razón el proceso, es por el momento, económico para desalinizar aguas salobres de contenido de sales inferior a 5.000 ppm. Sin embargo, debido a ventajas considerables de este método (poco desgaste de materiales, poca atención durante operación, bajo precio del agua desalinizada, etc.) se están investigando membranas de mayor eficiencia para agua salobre y agua de mar.

Por el momento se están utilizando membranas de acetato de celulosa, pero se están ensayando otros polímeros y fibras huecas estables a altas presiones, y también finas hojas metálicas (61).

Actualmente se conocen tres plantas en funcionamiento (56) con una capacidad entre 50.000 y 100.000 galones / día (190 y 380 m<sup>3</sup> / día) pero se están proyectando plantas mucho más grandes.

## II.2. Métodos de desalinización en desarrollo

### II.2.a Desalinización por destilación combinada del método de evaporación por tubo vertical y "flash" (VTE/MSF)

El estudio de este método combinado se está desarrollando mucho, en los últimos años (61) ya que posibilitaría reducir considerablemente el costo del agua producto, comparado al obtenido con grandes plantas MSF en uso actualmente.

Un esquema de este proceso de destilación se puede ver en la Fig. 7. Actualmente se encuentra en funcionamiento una planta de estudio con este proceso en Orange County Water District (California) con una capacidad de 3 millones de galones diarios ( $11,400 \text{ m}^3 / \text{día}$ ). Se está desarrollando en el mismo centro una planta de 200 millones de galones /día ( $760,000 \text{ m}^3 / \text{día}$ ) de capacidad.

### II.2.b Desalinización por congelación

El agua potable se puede producir por congelamiento parcial del agua de mar, separando luego por lavado la salmuera de los cristales de hielo y fundiendo estos últimos. Existen dos métodos:

#### i) Congelación directa:

Consiste en vaporizar el agua salina, previamente enfriada, en un recipiente a baja presión. Debido a la evaporación brusca de parte del agua se forman cristales de hielo mezclados con salmuera, que se bombean a un recipiente donde son lavados y fundidos.

#### ii) Congelación indirecta:

Este proceso es similar al anterior pero utiliza un refrigerante inmiscible (generalmente un hidrocarburo líquido) que es vaporizado en contacto directo con el agua salina, en un recipiente a baja presión. Esta vaporización provoca el enfriamiento y formación de cristales de hielo que quedan en suspensión en la salmuera. El proceso sigue como en el caso anterior, pero es necesario eliminar todo vestigio del hidrocarburo, para evitar problemas de mal sabor en el agua.

En ambos casos la transferencia de calor es efectuada sin la presencia de barreras metálicas. Así, fuerzas impulsoras relativamente bajas pueden ser empleadas en los sistemas de congelación y fusión.

Para preservar la energía ganada durante el congelamiento, debe ser recuperado el calor de cristalización y usado para fundir los cristales de hielo. Esto se puede llevar a cabo comprimiendo y condensando el vapor (o el hidrocarburo) sobre el hielo. La energía neta consumida es, por consiguiente, la que resulta de la irreversibilidad termodinámica del proceso.

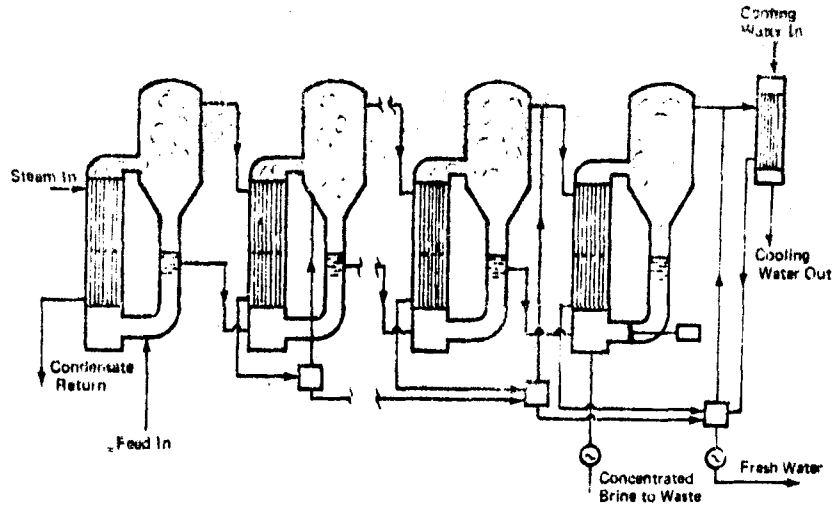


Figura 6.  
Diagrama de flujo de un proceso simplificado de evaporación por tubo vertical (VTE). (56).

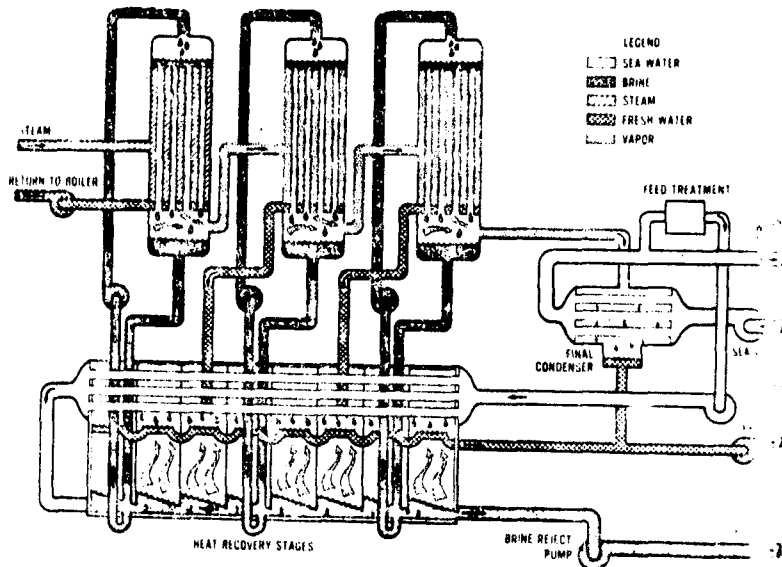


Figura 7.  
Diagrama del proceso de destilación combinada VTE/SMF. (61)



Un esquema de este proceso de congelamiento por vacío y compresión del vapor (VFVC) puede verse en la Fig. 8 (60).

El bajo consumo de energía, comparado con los procesos de destilación, así como la reducción de los inconvenientes ocasionados por la corrosión y las incrustaciones, al trabajar a baja temperatura, hacen que este proceso sea muy estudiado. Existe en operación una planta comercial de 100.000 galones /día (380 m<sup>3</sup>/ día) perteneciente al programa de desarrollo de la O. S. W. (61).

## II.2.c Otros procesos de desalinización

### i) Destilación por energía solar:

Esta entra en una categoría distinta a los procesos anteriores y es otro sistema de uso generalizado en todo el mundo. El agua de mar se coloca en depósitos de poca profundidad, con techo inclinado de vidrio o plástico transparente. El calor solar provoca la vaporización del agua, condensándose el vapor sobre el plástico y recogiendo en cubetas el agua dulce producida.

A pesar de que este método permite muchas variantes, todas tienen el inconveniente de exigir grandes extensiones de terreno. Además, este sistema sólo puede emplearse en lugares donde existe fuerte radiación solar. Por el momento sólo puede usarse ventajosamente en plantas pequeñas (menores de 25.000 galones/día, 95 m<sup>3</sup>/día) (83).

### ii) Intercambio iónico;

Como proceso de desalinización constituye una tecnología bien desarrollada, pero debido al costo de los productos químicos necesarios para la regeneración de las resinas sólo ofrece resultados económicos en el tratamiento de aguas con bajo contenido de sales, es decir con menos de 1.000 ppm. Actualmente se está tratando de mejorar el método para producir agua potable en gran escala.

### iii) En Israel se está ensayando una modificación del sistema de destilación "flash", que consiste en producir la condensación del vapor por contacto directo con agua potable, en lugar de utilizar un intercambiador, en el que generalmente se producen fenómenos de corrosión. Esencialmente el sistema consiste en una serie de canales abiertos, la mitad de ellos con teniendo el agua salina y la otra mitad el agua destilada. Se mantiene una pequeña diferencia de temperatura entre el agua salina y el agua destilada. Debido a esta diferencia, el vapor de agua proveniente de la solución salina se condensa en el agua destilada más fría, contenida en el recipiente adyacente (proceso Kogan) (1,2,47).

### iv) Otro proceso de destilación que se está desarrollando en el mencionado país es el de evaporación de película en tubos horizontales, por pulverización

ón y de múltiple efecto (1,2).

Este sistema consiste en pulverizar el agua salina sobre una serie de tuberías horizontales por las que circula vapor en su interior. El vapor producido por evaporación en la película del exterior de los tubos, se condensa dentro de los tubos del efecto siguiente, evaporando el agua salina depositada por pulverización en forma de película en el exterior de los tubos. El proceso opera a presiones menores que la atmosférica y la máxima temperatura operativa es de 165°F (74°C). La diferencia de presiones entre dos unidades de evaporación adyacentes es mínima. Esta baja temperatura operativa y la ausencia de circulación forzada de fluidos dentro o fuera de los tubos del evaporador, permitió construirlos con aleaciones de aluminio-magnesio, de bajo costo (aleaciones serie 5000 ó 6000).

### II.3

Concluyendo, podemos puntualizar que los procesos de desalinización por destilación y congelación son más convenientes para aguas con un alto tenor salino (agua de mar), mientras que los procesos que se basan en el empleo de membranas, como la electrodiálisis o la ósmosis inversa, son más apropiados para aguas que poseen un grado de salinidad más bajo. Además del grado de salinidad es importante tener en cuenta la composición química del agua a desalinizar.

La elección del método de desalinización a emplearse depende también, en gran parte, de los factores económicos involucrados: gastos de instalación, precio del combustible, etc.

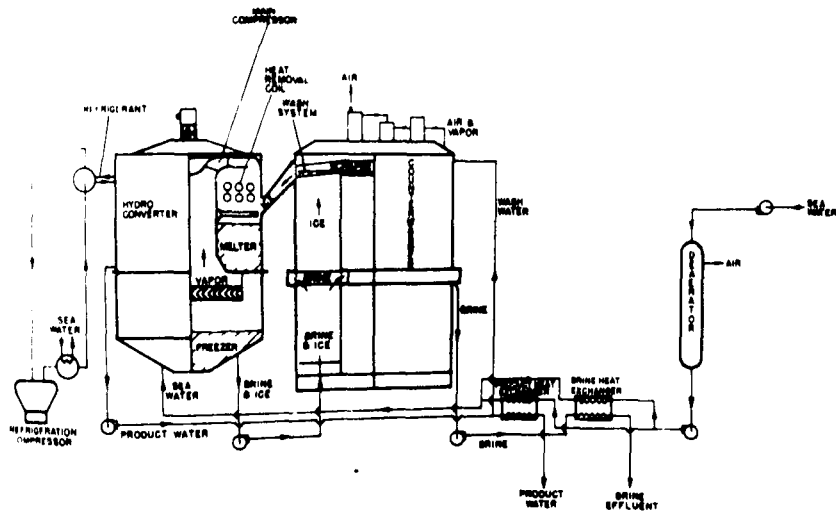


Figura 8.

Diagrama de funcionamiento de un equipo de congelación por vacío y compresión del vapor (VFVC). (60).



### III. ESTADO ACTUAL DE LA DESALINIZACION

#### III.1 Plantas desalinizadoras en funcionamiento

Periódicamente se llevan a cabo informes sobre experiencias operativas en las plantas desalinizadoras en funcionamiento. En 1966, la IAEA (85) hizo un censo de 87 plantas en 21 países (excluyendo a las experimentales y las de baja capacidad operativa), de las cuales 32 eran de destilación "flash" por etapas múltiples (MSF), 30 de destilación por tubo sumergido (STD) y 17 de destilación por compresión del vapor (VC). Las demás eran de evaporación por tubo vertical (VTE) y electrodiálisis (ED).

Actualmente se considera que la destilación por tubo sumergido, método instalado en Kuwait entre 1950 y 1955, es obsoleto (85) y que el método más usado en la actualidad es el método "flash" (MSF).

En marzo de 1972 la O. S. W. (56) publicó un informe sobre el comportamiento de materiales en plantas de desalinización, repartidas según los siguientes métodos:

148 plantas MSF, cuya capacidad varía entre 50.000 y 48.000.000 galones /día (190 a 180.000 m<sup>3</sup> /día).

24 plantas VTE, con capacidad entre 58.000 y 1.000.000 galones /día (220 a 3.800 m<sup>3</sup> /día).

14 plantas ED, con capacidad entre 58.000 y 1.200.000 galones /día (220 a 4.560 m<sup>3</sup> /día).

3 plantas RO, con capacidad entre 50.000 y 100.000 galones /día (190 a 380 m<sup>3</sup> /día).

1 planta VC, de 1.000.000 galones /día (3.800 m<sup>3</sup> /día).

Como se ve hay un aumento marcado en la cantidad de grandes plantas desalinizadoras por destilación, especialmente en lo que corresponde a plantas de doble propósito, y en la actualidad se sabe que existen en el mundo cerca de 700 plantas desalinizadoras por destilación, con una capacidad total estimada de 300 millones de galones /día de agua potable (1.140.000 m<sup>3</sup> /día) (69).

La planta desalinizadora por destilación de mayor capacidad en la actualidad produce de 4 a 5 millones de galones /día (26,69) y puede abastecer a una ciudad de 40.000 habitantes de alto nivel de consumo de agua "per cápita". Se prevé que en el futuro se tendrán plantas desalinizadoras que produzcan 1.000 millones de galones /día (3,8 millones de m<sup>3</sup> /día) y es por eso que se están construyendo plantas desalinizadoras de 50 a 100 millones de galones /día (190.000 a 380.000 m<sup>3</sup> /día) para desarrollar la tecnología adecuada a grandes plantas. En U.S.A. está en operación un módulo de destilación "flash" por etapas múltiples que produce 17 millones de galones diarios (64.600 m<sup>3</sup> /día) (69) y se está planeando una que combine MSF con VTE para obtener un mayor rendimiento. Se están ensayando modelos matemáticos (3) y programas

de cálculos que representan los métodos de desalinización, tomando en cuenta los principales fenómenos que intervienen en los procesos, con el fin de evaluar métodos y optimizarlos.

### III.2 Costo del agua desalinizada

El costo del agua producto depende de (76) la inversión de capitales, recargos financieros, costos de energía, mano de obra y mantenimiento de la planta, tratamiento previo del agua salada y, fundamentalmente, del tamaño y tipo de planta (doble o simple propósito).

En los casos de agua potable obtenida por electrodiálisis y ósmosis inversa, el costo del agua producto depende del contenido de sales del agua a purificar. Para una planta ED con producción de 10 a 50 millones de galones /día (38.000 a 198.000 m<sup>3</sup> /día), para aguas con 3.000 ppm. de sales, el costo sería de 0,20 a 0,30 dólares /1.000 galones (44). Para ósmosis inversa con una capacidad de 1 millón de galones /día (3.800 m<sup>3</sup> /día) y un agua de 10.000 ppm. de sales disueltas se estima que el costo sería de 0,65 dólares / 1.000 galones (56), bajando a 0,45 dólares / 1.000 galones para agua de menor contenido de sales (50,56).

Los precios del agua desalinizada obtenida por destilación aparecen en la Fig. 9 (61,72). En la misma se comparan las diferencias de precio para distintos tamaños de planta. Se hace también una estimación de la variación probable del precio al ir mejorando la tecnología. En la Fig. 10 se comparan los precios del agua potable obtenida por desalinización con los del agua obtenida por métodos tradicionales (11). Tal como puede verse, en la actualidad el agua obtenida por desalinización es competitiva con el agua obtenida por otros métodos, y se estima que en un futuro próximo la primera puede llegar a ser más barata que la segunda.

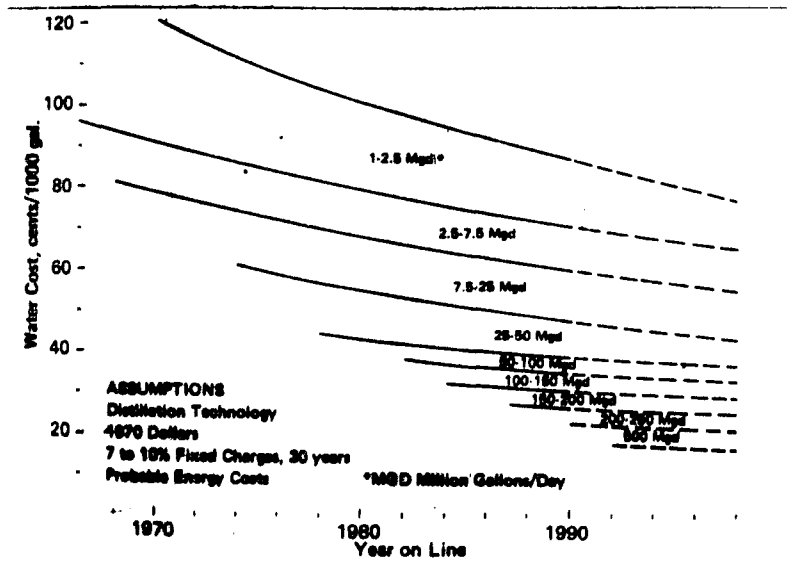


Figura 9.

Costos de agua de mar desalinizada usando tecnología de destilación, en función del tamaño de planta. (61).

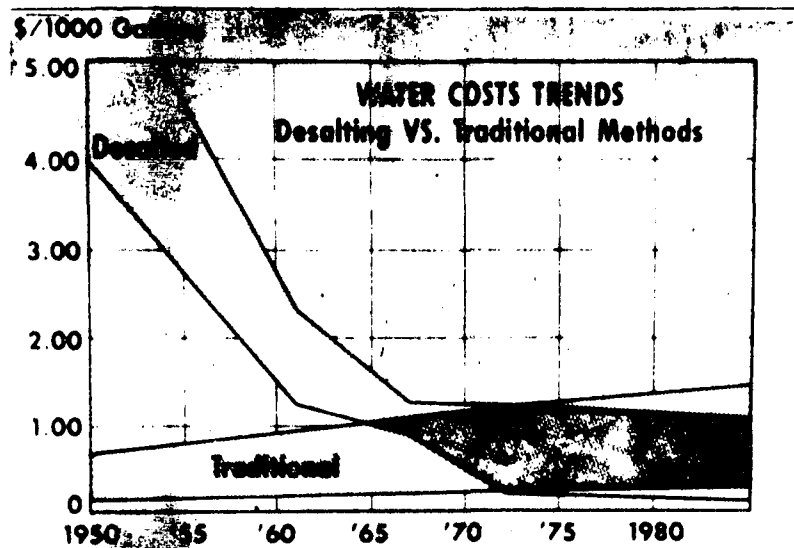


Figura 10.

Comparación de costos y perspectiva de los mismos para métodos de obtención de agua potable, tradicionales y por desalinización (11).



#### IV. EL SISTEMA DE DESTILACION "FLASH"

##### IV.1 Descripción somera de la planta

En la sección II.1.a, vimos el principio de funcionamiento del proceso de destilación "flash". En la fig.11 se muestra el diagrama de circulación que sigue el agua de mar en una planta MSF (26). Tal como se observa en dicha figura, el conjunto de cámaras de destilación está dividido en dos secciones. Una de ellas, 22 etapas en la figura, corresponde a la de recuperación del calor. La otra sección, 3 etapas en la figura, corresponde a la de eliminación del calor. En la misma figura se indican los valores de temperatura del agua y de velocidad de circulación en las diferentes etapas.

##### IV.2 Tratamiento previo del agua de mar en la destilación "flash"

El sistema de destilación "flash" del agua de mar exige el tratamiento previo de la misma para evitar problemas de incrustaciones en el equipo.

Es sabido que el agua de mar, además del cloruro de sodio, contiene otras sales, entre las que se encuentra el bicarbonato de calcio, el cloruro de magnesio y el sulfato de calcio, que son los directamente responsables de la aparición de incrustaciones en ciertas partes del equipo de destilación. El problema es particularmente serio cuando se trata de un depósito sobre los intercambiadores de calor, ya que se aumenta mucho la resistencia térmica. Además, se encuentran presentes microorganismos marinos que también producen incrustaciones (fouling) (Ver Cap. 3).

Las incrustaciones de origen inorgánico están formadas por carbonato de calcio, hidróxido de magnesio, sulfato de calcio y, en menor proporción, por hidróxido férrico y sílice (81).

El carbonato de calcio se produce por descomposición térmica del bicarbonato de calcio. Esta reacción comienza a producirse a una temperatura de 76°C (170°F), localizándose la precipitación en las partes más calientes del equipo. Como resultado de esta reacción, se produce un aumento en el pH del agua que induce la precipitación del hidróxido de magnesio.

Por otra parte, el sulfato de calcio (del cual existen tres tipos según el grado de hidratación: anhidro, hemihidrato y dihidrato) posee solubilidad inversa y produce incrustaciones a temperaturas más elevadas (79).

Existe una serie de métodos de prevención de depósitos marinos y salinos que se aplican en la actualidad. Ellos son: esterilización, inhibición del crecimiento cristalino, control del pH, germinación e intercambio iónico.

#### IV.2.a Esterilización

En las usinas eléctricas ubicadas en la costa marina existe el problema del desarrollo de la fauna y flora marina en las canalizaciones que transportan el agua de mar. Este problema fue resuelto mediante la cloración del agua de mar, siendo desarrollado actualmente un método de cloración que produce cloro "in situ" por electrólisis del agua de mar (10). La dosis de cloro adicionada debe ser suficiente para lograr la máxima eficacia de esterilización, y a su vez, es necesario evitar un exceso en el nivel de cloración para evitar fenómenos de corrosión en los destiladores y modificaciones ecológicas en las proximidades de la descarga de salmuera.

#### IV.2.b Inhibición del crecimiento cristalino

Existen ciertos tipos de compuestos que inhiben el crecimiento cristalino (tartrífugos) y que, por lo tanto, son eficaces para evitar las incrustaciones de carbonato y sulfato de calcio. Por ejemplo, adicionando una pequeña cantidad de polifosfatos (2-5 ppm) el precipitado no se fijará en las paredes de los tubos del intercambiador de calor (17, 58). Esta técnica permite alcanzar una temperatura máxima de operación de 90°C para un factor de concentración de 2 (58). No obstante, algunos autores (13) informaron que a pesar de este tratamiento, se forma un lodo adherente en las superficies de intercambio térmico, por lo que es necesario efectuar limpiezas periódicas del destilador con ácido clorhídrico y un inhibidor de la corrosión. Otros autores (78) encontraron que un agregado de poliácrilatos (polímeros del ácido acrílico) reduce la velocidad de formación de incrustaciones. Parece ser que basta un agregado de 3 ppm de este producto para evitar la aparición de incrustaciones en los evaporadores.

#### IV.2.c Control del pH

Este método permite una temperatura de trabajo superior a la del caso anterior. Los carbonatos presentes en el agua de mar se pueden destruir por acidificación y eliminación del anhídrido carbónico producido. Este procedimiento utiliza importantes cantidades de ácido (120 ppm de ácido sulfúrico para un agua de mar promedio), aunque esta cantidad puede reducirse tres o cuatro veces si se trabaja a presión controlada (10).

Adicionando el ácido en cantidad suficiente, la alcalinidad total baja hasta 10-15 ppm y el pH alcanza un valor cercano a 4, (79).

Al descomponerse el bicarbonato de calcio, se producen unas 100 ppm de anhídrido carbónico (79), que es necesario eliminar, junto con el oxígeno, para evitar problemas de corrosión y, con el mismo fin, es conveniente reajustar el pH hasta un valor de 7,5 mediante la adición de hidróxido de sodio.

Habiéndose eliminado el carbonato de calcio, el riesgo sigue siendo el de depósitos salinos que provienen de la precipitación de los diferentes sulfatos de calcio que poseen solubilidad inversa, es decir que disminuye su solubilidad al aumentar la temperatura. En la Fig. 12 (10, 19) se da un diagrama de

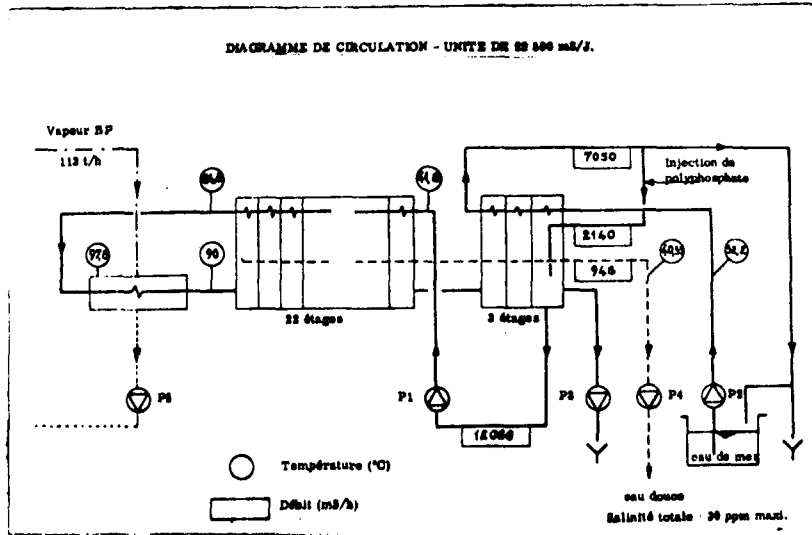


Figura 11.

Diagrama de circulación para una planta MSF de 22.500m<sup>3</sup>/día (26).

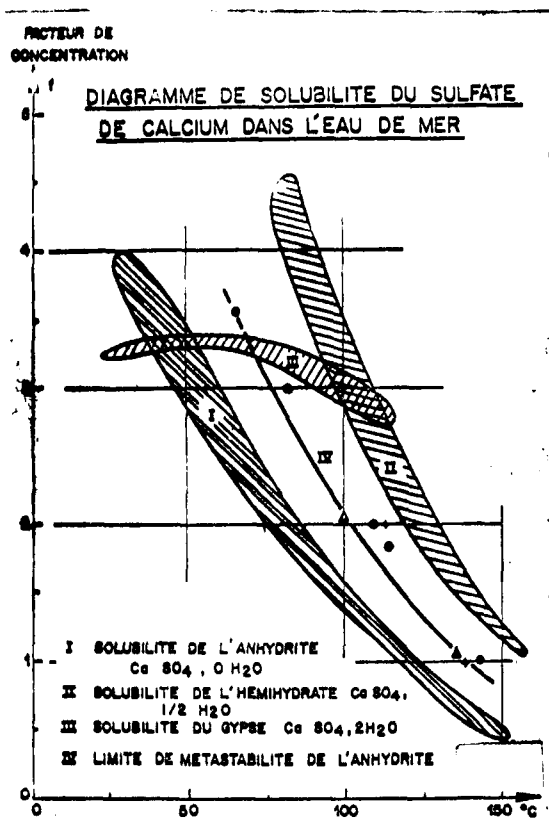


Figura 12.

Diagrama de solubilidad del sulfato de calcio en el agua de mar (10).



solubilidad del sulfato de calcio (anhidro, hemihidrato y dihidrato) a diferentes temperaturas y factores de concentración.

Para evitar los riesgos de depósito, habría que trabajar a valores de factores de concentración-temperatura que están por debajo de los dominios de precipitación.

Si se trabaja por debajo del dominio de precipitación del sulfato de calcio anhidro (anhidrite), línea 1, tendremos seguridad absoluta de que no se producirán incrustaciones. Esto significa que, si se trabaja con agua de mar sin concentrar (factor 1) la temperatura máxima de trabajo del destilador deberá ser 110°C, mientras que, si se trabaja con agua de mar de factor de concentración 2, la máxima temperatura de trabajo se encontraría en 75°C.

Debido a estas bajas temperaturas operativas, lo que significa una disminución en la producción de la planta, se suele trabajar en la zona intermedia entre la zona de precipitación del anhídrite y la de solubilidad del sulfato de calcio hemihidrato (línea 2), aceptando el riesgo de que se produzcan incrustaciones de anhídrite en las superficies de intercambioalórico.

Balligand y colaboradores (10), efectuando ensayos con agua de mar a distintos factores de concentración, encontraron una zona de metaestabilidad del sulfato de calcio anhidro (línea IV) ubicado por encima de la curva de solubilidad del mismo y donde el riesgo de aparición de depósitos salinos es despreciable. En esta zona la cinética de nucleación de los cristales de anhídrita es lenta. En estas condiciones, la temperatura máxima del agua de mar no concentrada puede llegar a 130°C y para un factor de concentración de 2, se puede trabajar alrededor de los 100°C.

#### IV.2.d Germinación

En ciertas plantas de destilación de agua de mar se previenen los depósitos alcalinos en las tuberías mediante la adición de 10 a 20 g/l de gérmenes sólidos de hidróxido de magnesio y carbonato de calcio. Sobre estos gérmenes se depositarán preferencialmente el carbonato de calcio y el hidróxido de magnesio. Una técnica similar se emplea en Francia donde se utiliza un método de siembra de anhídrita (sulfato de calcio anhidro) para evitar las incrustaciones de sulfato de calcio (10).

#### IV.2.e Intercambio de iones

Las resinas intercambiadoras de iones del tipo de poliestireno sulfúrico permiten reducir la concentración de los iones calcio del agua de mar desde 440 hasta unos 120 mg./l. La regeneración de las resinas se efectúa con salmuera concentrada (10).

#### IV.2.f Procesos de pretratamiento del agua de mar en estudio

Recientemente la O.S.W. demostró -con una planta piloto- que usando un método de desulfatación con bario del agua de mar que ingresa al destilador, se puede trabajar hasta temperaturas de 176°C (350°F) con aguas de mar muy concentradas, sin que se produzcan incrustaciones en las superficies de intercambio calórico. Este tratamiento no sólo permitiría elevar el rendimiento de las plantas sino disminuir los costos del agua obtenida (61), ya que los métodos de tratamiento del agua de mar en uso son muy caros. Usando resinas que contienen iones bario es posible eliminar el sulfato y el carbonato por precipitación (29).

Otro método de control de incrustaciones en estudio consiste en el agregado de dióxido de carbono para prevenir la formación de incrustaciones de carbonatos, manteniéndolos como bicarbonatos solubles (61, 29\*).

También se está estudiando un proceso de eliminación de los iones calcio y magnesio por precipitación en el agua de mar antes de entrar en la planta. Con este último método se podría trabajar a temperaturas y factores de concentración muy elevados (61).

#### IV.3 Tipo de materiales utilizados en la construcción de cada componente del equipo de destilación "flash"

Describiremos a continuación los distintos materiales utilizados en la construcción de diversas partes del equipo de destilación "flash" y su comportamiento en las plantas en servicio, en base a la literatura existente hasta la fecha.

La zona más crítica del equipo, en cuanto a problemas de corrosión, la constituyen los intercambiadores de calor que, como ya puntualizamos, corresponden a alrededor del 40% del costo total de la planta destilación "flash" (42, 90). De allí la importancia de encontrar aleaciones que sean adecuadas desde el punto de vista de su costo y resistencia a la corrosión, para esta parte del equipo.

Es también muy importante en la elección de los materiales a utilizar un estudio de la composición del agua de mar, presencia de ríos, canales e industrias (polución) cerca de la toma de agua, contenidos de O<sub>2</sub>, arena y organismos marinos. Generalmente, para la selección de materiales, se supone que el porcentaje de sales es de 3,2 a 3,8 %.

##### IV.3.a Tuberías de los intercambiadores de calor

Las aleaciones más comúnmente utilizadas en la construcción de las tuberías de estos intercambiadores son;

latón almirantazgo inhibido (25), latón de aluminio (85, 17, 80, 64, 54, 18, 9, 25, 56), bronce de aluminio (45, 25, 77).

aleación cobre-níquel 70/30 ( 85, 18, 90, 42, 25, 80, 77, 56);  
 aleación cobre-níquel 90/10 ( 85, 18, 79, 17, 9, 43, 25, 80,77, 56);  
 aleaciones cobre-níquel-hierro (Cu Ni 90/10-Fe 1, 5) (54,7), 70-30  
 Cu Ni con 0,5 Fe (7) ó con 2% Fe (56);  
 Hastelloy C (25), titanio (58, 42, 25, 31, 49) y bimetales (25).

Existen también dos plantas prototipo (56) totalmente construídas en Aluminio Alclad 6051.

La tabla siguiente da el porcentaje de los diferentes materiales utilizados en cierto número de plantas en funcionamiento (56).

Aleación	Porcentaje total en 55 unidades, año 1968	Porcentaje total en 119 unidades, año 1971
Latón de aluminio arsenical	74	53
90/10 Cu Ni	9	33
70/30 Cu Ni	} 15	1,8
70/30 Cu Ni + 2% Fe, Mn		11,4
Titanio	2	0,8

Un análisis de la información sobre desalinización de los últimos 15 años (56) muestra que en los intercambiadores de calor el latón al aluminio está siendo desplazado por el cuproníquel Cu-Ni 90/10.

En las etapas más críticas, desde el punto de vista de la corrosión (las primeras etapas de la sección de recuperación de calor y la sección de eliminación de calor ), las tuberías suelen ser de cobre níquel 90/10, mientras que en el resto suele ser de latón de aluminio (80).

En el estudio de comportamiento de materiales realizado por la O. S. W. (56) en marzo de 1972, se reseñaron 1,66 millones de tubos intercambiadores, encontrándose que el 1,4% en número sufrieron fallas y fueron tapados o reemplazados. Con respecto a las causas de las fallas, un estudio realizado sobre 86 casos de incidentes mostró que el 41% correspondía a corrosión por picado, llegando a perforarse los tubos, el 21% correspondía a erosión-corrosión por impacto y el 14% a erosión-corrosión del lado de la carcasa.

El 24% restante se debería a fisuración, corrosión por sulfuro de hidrógeno, ruptura accidental durante la remoción de las incrustaciones, tapona

miento con incrustaciones ó defectos de fabricación. En la tabla siguiente (56) se dan los porcentajes totales de tubos reemplazados para dos períodos de trabajo.

Aleación	<u>% total de tubos reemplazados</u>	
	1967-68	1970-71
Latón aluminio	0,88	2,19
90/10 Cu Ni	2,95	1,00
70/30 Cu Ni	0	1,00
70/30 Cu Ni + 2% Mn, Fe	0	0,25

Es importante puntualizar que esta tabla da sólo una idea aproximada del comportamiento de los diferentes materiales, ya que usáanse en diferentes partes de los intercambiadores de calor, siendo el latón de aluminio y el Cu Ni 90/10 los que se usaron preferencialmente en las zonas más corrosivas como ser recuperación y eliminación del calor.

A continuación se reseñarán las propiedades de resistencia a la corrosión de algunas de las aleaciones utilizadas en la construcción de los intercambiadores de calor.

#### IV.3.a.i Latón almirantazgo inhibido:

(70-73% cobre; 28% cinc; 0,9-1,2% estaño; 0,10% inhibidor de arsénico, antimonio o fósforo; 0,07% máximo de plomo y 0,06% máximo de hierro).

Esta aleación posee una buena resistencia a la corrosión en aguas ligeramente contaminadas y en agua de mar. El inhibidor mejora su resistencia a la decimficación. Para aguas ligeramente ácidas a alta temperatura se prefiere el uso del latón almirantazgo fosforado en lugar del arsenical. Los tubos y placas tubo construídos con este latón son vulnerables a la erosión-corrosión por turbulencia y para velocidades de flujo superiores a 5-6pies /seg. (1,5m/seg) Por otra parte, no se puede utilizar este material para temperaturas superiores a 200°C (390°F) (25).

#### IV.3.a.ii Latón de aluminio:

(76-79% cobre; 18-22% cinc; 1,8-2,5% aluminio; 0,20% arsénico; 0,07% máximo de plomo; 0,06% hierro).

Esta aleación posee una resistencia a la corrosión similar a la del latón almirantazgo (25). La adición del aluminio al latón le confiere la propiedad de una mayor resistencia a la corrosión y a la erosión a altas velocidades de flujo debido a la formación de una película protectora auto-reparable. Esta aleación es resistente a la turbulencia y es recomendada para agua de mar, excepto cuando arrastra arena o cuando está contaminada con sulfuro de hidrógeno. La velocidad del agua debe mantenerse dentro de los valores de 3 a 7 pies /seg. (1 a 2m/seg.), siendo la óptima entre 4 a 6 pies /seg. (1,2 m/seg a 1,8 m/seg). Un estudio de uno de los primeros evaporadores instalados (64) en Curacao en 1964, que usa tratamiento ácido del agua de mar, mostró que los tubos intercambiadores construídos con latón de aluminio no presentaron problemas.

#### IV.3.a.iii Bronce de aluminio:

(aleaciones de cobre con 5 a 10% de aluminio).

Esta aleación posee propiedades mecánicas superiores a las del latón de aluminio y puede utilizarse como recubrimiento de placas tubo. Debido a que la corrosión galvánica, producida por la diferencia de potencial entre el latón y el bronce de aluminio, no es considerada severa, es posible utilizar tubos de latón de aluminio y placas tubo recubiertas con bronce de aluminio. Es importante para las aleaciones cobre-aluminio el tratamiento térmico ya que presentan ataque intergranular en estado recocido (13).

#### IV.3.a. iv Cobre-Níquel 90/10:

(86,5% cobre; 9,0-11,0% níquel; 1,0-1,8 % hierro; 1,0% máximo de manganeso; 0,05% plomo).

A pesar que esta aleación es más costosa que la de latón de aluminio, los tubos y placas-tubo hechos con este material tienen un comportamiento superior en aguas salobres y de mar, especialmente a temperaturas elevadas y altas velocidades. Esta aleación posee una muy buena resistencia a la erosión-corrosión, a la corrosión bajo tensiones y a la cavitación. Su resistencia en medios con sulfuro de hidrógeno es superior a la de la aleación cobre-níquel 70-30. La velocidad del agua deberá ser mantenida entre 6 y 12 pies /seg. (1,8 a 3,4 m/seg.), siendo el óptimo entre 7 y 9 pies /seg. ( 2m/seg. y 2,6 m/seg.) (25).

## IV.3.a.v Cobre-Níquel 70/30:

( 65,0 % mín. de cobre; 29,0-33,0 % níquel; 0,40-0,70 % hierro; 1,0 % máx. de cinc; 1,0 % máx. de manganeso; 0,05 % plomo).

Las propiedades de esta aleación son similares a aquéllas del cobre-níquel 90/10. En la mayoría de los casos la aleación cobre-níquel 70/30 posee aún una mayor resistencia a la corrosión-erosión a altas velocidades del agua y a elevadas temperaturas. Generalmente es resistente a la corrosión bajo tensiones y a la cavitación. La mayor limitación al uso de esta aleación es la corrosión por medios que contengan azufre y sus compuestos. La velocidad del fluido deberá ser mantenida en los mismos valores o ligeramente superiores a los recomendados para la aleación cobre-níquel 90 /10.

## IV.3.a.vi Cobre-Níquel 80/20:

Las propiedades de resistencia a la corrosión de esta aleación son ligeramente inferiores a las del cobre-níquel 70/30. Esta aleación puede ser utilizada cuando las condiciones corrosivas del medio no justifiquen el uso del cobre-níquel 70/30- (25).

## IV.3.a.vii Comportamiento de estos materiales

Se encontró (13) que el ataque de latones y de aleaciones que contienen cobre y aluminio se revela particularmente sensible al aumento de la temperatura, aereación diferencial y existencia de rendijas. Para soluciones de aereadas la corrosión de estas aleaciones en agua de mar caliente es mucho menor y no se observa corrosión en rendijas.

En un trabajo de P.J. Boden (14) sobre comportamiento del cobre en condiciones de transferencia de calor, se encontró que, para soluciones aereadas de ClNa 3% a ebullición, las probetas de cobre sometidas a condiciones de transferencia de calor sufrían una pérdida de peso 200 veces mayor que aquéllas simplemente sumergidas en la misma solución (corrosión-termogalvánica). Encontró que el O<sub>2</sub> disuelto puede contribuir a incrementar la corrosión termo-galvánica debido a que la principal reacción catódica es la reducción del oxígeno. En un trabajo posterior (15) el mismo autor encontró que las aleaciones de cobre son más resistentes en condiciones de transferencia de calor y se supone que el cupro-níquel lo es de manera especial ya que la reacción de reducción del oxígeno es más lenta.

Los resultados obtenidos en ensayos a circuito cerrado, con temperaturas entre 40°C y 150°C y velocidades de circulación del agua de mar entre 1 y 25 m/seg. (13) mostraron que los cupro-níquel que contienen hierro (66/30/2) sufren, después de 1000 h de exposición, una intensa desniquelación y ataque intergranular, mientras que los cupro-níquel y cupro-aluminio se mues

tran más resistentes a la corrosión en rendijas.

Sin embargo, en la planta de destilación "flash" construida en Brindisi (Italia) en 1969 (54) se instalaron condensadores de cupro-níquel 90/10 con 1,5% de hierro, ya que encontraron que esta última aleación no solamente es resistente a la corrosión sino también a la erosión, y resiste altas velocidades de circulación (3,6 m/seg.). Además parece ser un material menos sensible a la acción del agua de mar contaminada y no sería propenso a la corrosión fatiga.

Por otra parte, se notó (74) que casi todos los problemas de corrosión en tubos intercambiadores de cobre o sus aleaciones se producen en el 1er. año de uso. Esto está relacionado con la formación de una película protectora en la superficie del tubo por lo que es muy importante que las condiciones de puesta en marcha de la planta sean tales que permitan la rápida y uniforme formación de tal película. Se puede obviar este problema formando la película pasivante anteriormente a la puesta en marcha, tomando en cuenta que tal película deberá proteger al tubo en condiciones de servicio y servir de soporte de la película natural que se irá formando. Este film se puede obtener por oxidación en frío en soluciones acuosas (ClNa 5 g/l;  $\text{CrO}_4\text{K}_2$  1 g/l;  $\text{SO}_4\text{Na}_2$  1 g/l) o por oxidación por aire caliente. Se demostró que este último método da películas pasivantes superiores.

#### IV.3.a.viii Otros materiales: Metal monel (67% Ni; 30% Cu).

Esta aleación mostró un comportamiento muy satisfactorio frente al agua de mar, pero tiene el inconveniente de su alto costo.

#### Hastelloy C. (Aleación de Ni con 17%Mo y 17%Cr); y Titanio.

Son los materiales más resistentes frente al agua de mar y aguas contaminadas. Debido a su alto precio únicamente se utilizan cuando es inconveniente el uso de aleaciones de menor costo (25).

El titanio fue estudiado (13) en un circuito cerrado con una velocidad de flujo de 1,8 m/seg. Se mostró que luego de 1000 h no se presentaba corrosión pero después de 4000 h (1000 de las cuales transcurrieron con agua de mar aerada) se encontró corrosión por rendijas en las juntas con etileno-propileno. Este efecto se incrementa con el aumento de la temperatura. En otro trabajo (13) también se encontró corrosión por rendijas del titanio con Teflón en agua de mar aerada, aunque la corrosión generalizada fué muy débil. En St. Croix (Islas Vírgenes) se instaló una planta desalinizadora por el sistema de destilación "flash" en etapas múltiples, con una capacidad de 750.000 galones/día ( $2.850 \text{ m}^3/\text{día}$ ) de producción de agua potable y cuyos intercambiadores son de titanio. Luego de dos años de funcionamiento no se produjeron problemas de corrosión en esos intercambiadores (90, 31). En un estudio sobre intercambiadores de titanio (49) se estima que éstos deberían

durar más de 30 años en servicio.

#### Materiales bimetálicos:

Se utilizan tubos bimetálicos cuando difieren las condiciones corrosivas internas, de las externas. Por ejemplo, se utilizaron tubos de latón de aluminio/acero al carbono para soluciones salinas ligeramente contaminadas en el interior de los tubos y un hidrocarburo aromático no corrosivo en el exterior de los mismos (25).

#### Intercambiadores recubiertos por pintura:

Recientemente se están desarrollando estos intercambiadores de bajo costo, recubriendo acero al carbono u otras aleaciones metálicas con pinturas epoxi y fenólicas (25).

Las ventajas son: bajo precio, bajo grado de incrustaciones, buena resistencia a aguas ácidas y alcalinas. Las limitaciones son: vulnerabilidad a desgaste mecánico, temperatura máxima de trabajo entre 100 y 160°C (212 y 320°F).

#### IV.3.b Tubos calefactores del agua de mar

Los tubos calefactores del agua de mar, que se encuentran ubicados inmediatamente antes de la primera cámara flash del conjunto de unidades de recuperación de calor, utilizan vapor sobrecalentado como elemento calefactor. En su construcción se utilizan aleaciones de cobre-níquel 90/10 (85,9,43), cobre-níquel 70/30 (85,18); y latón de aluminio (85,17).

#### IV.3.c. Placas tubo

Generalmente, las placas-tubo se hacen o recubren cuando es posible laminar con el material de los tubos, pero es muy importante lograr una buena unión entre el material de base y el de cobertura. Generalmente se obtienen buenos recubrimientos por soldadura o explosión (25).

La mayoría de las plantas usan placas-tubo de cupro-níquel 90/10 o latón naval. En 1971, el 81% de las plantas usaban estas dos aleaciones (56). A continuación damos una lista de aleaciones y número de plantas que las usaron.

Materiales para placas-tubo	Nº de unidades
Cobre-níquel 90/10	57
Latón naval	49
Bronce o bronce de aluminio	7

Latón de aluminio	7
Cobre--níquel 70/30	3
Aluminio Alclad 6061	2
Titanio	1
Acero plaqueado con níquel	1
Latón almirantazgo	1
Metal Muntz (Cu-Zn 60/40)	1
Acero plaqueado con 90/10 Cu-Ni	1
Acero plaqueado con monel	1

No se registraron problemas serios de corrosión y erosión en los materiales de las placas-tubos. Se encontró algo de picado y/o erosión por turbulencia pero nunca fue necesario reemplazar las piezas.

#### IV.3.d Recipientes para agua

El material básico de construcción de los recipientes para agua sigue siendo el acero al carbono. El 76% de estos recipientes son de acero y se usan con o sin recubrimiento o plaqueado. El porcentaje de recipientes de acero sin recubrir bajó en los últimos años (de 23% en 1968 a 15% en 1971).

La tabla siguiente da las aleaciones empleadas en diferentes plantas desalinizadoras MSF (56).:

Materiales de recipientes para agua	Nº de unidades
Acero recubierto con resina epoxi, caucho, cauchodorado o plásticos reforzados con fibra de vidrio (FRP).	58
Acero plaqueado con 90/10 cupro-níquel	22
Acero sin recubrir	19
Acero, plaqueado con monel	2
Acero, plaqueado con "Inoxida 90" (Al-Ni bronce)	2
Acero, recubierto con concreto	2
Acero, plaqueado con acero inoxidable	1
Hierro fundido, sin recubrir	3

Hierro fundido, recubierto con resina epoxi, caucho clorado o FRP	7
Cobre-níquel 90/10 no recubierto	20
Cobre-níquel 70/30 no recubierto	1
Aluminio Alclad 6061	2

Además, en muchas plantas (43 unidades) se aplica algún tipo de protección catódica, usando ya sea ánodos de sacrificio de cinc (17 unidades), acero (16 unidades), magnesio (4 unidades) o aluminio (1 unidad) o aplicando corrientes impresas con ánodos de titanio platinizados (5 unidades).

Los ánodos de acero no dan protección a los recipientes para agua de acero, pero previenen el picado en las placas-tubo, tubos y recipientes de aleaciones de cobre. Las bandejas de recolección de agua destilada se construyen con acero al carbono y generalmente se recubren con resinas epoxi, goma vulcanizada, etc. (79, 17, 43, 80).

La corrosión de los recipientes de acero o hierro fundido sigue siendo uno de los problemas más serios en el mantenimiento de las plantas MSF.

Alrededor del 40% de los recipientes que se estudiaron en el informe de la O.S.W. (56) mostraban picado entre moderado y extensivo, corrosión generalizada, grafitización del hierro fundido y, en los casos de recipientes recubiertos, problemas serios en el mantenimiento del recubrimiento protector para altas velocidades de salmuera caliente. Todo esto influye en mantener muy altos los costos de manutención, bajar la producción de agua y, por lo tanto, elevar el costo del agua producto.

Por esta razón actualmente se prefiere el uso de recipientes de acero recubiertos por plaqueado con aleaciones resistentes a la corrosión, como son los cupro-níquel 90/10, monel, bronce de aluminio-níquel, o usar directamente recipientes de acero inoxidable, Cu-Ni 90/10 ó 70/30. Las plantas que usaron dichos recipientes no mostraron problemas de corrosión.

El uso de protección catódica, acompañada por recubrimientos orgánicos dió resultados satisfactorios en recipientes de acero y hierro. Se estudiaron (13) varios revestimientos: resinas epoxi, poliuretanos, cauchos (butilo neoprene, viton), revestimientos inorgánicos, resinas fenólicas, siliconas, buscando revestimientos de gran adherencia (aún a bajas presiones), resistencia a la erosión y abrasión, e inercia química.

#### IV.3. e Cámaras "flash" y componentes

Practicamente, en todas las grandes plantas desalinizadoras que utilizan el sistema de destilación "flash" en etapas múltiples, las cámaras "flash" están construídas en acero de bajo carbono (mild steel) sin recubrir o recu-

brimientos variados (caucho clorado, resina epoxi, aleaciones resistentes, etc) (26, 17, 58, 13, 90, 9, 43, 8, 39, 52, 7, 56), en algunas etapas o en toda la unidad.

En muchas plantas que usan agua de mar con tratamiento ácido, la etapa más caliente (Nº 1) fue recubierta con placas de acero inoxidable. En otras plantas la experiencia demostró que las cámaras de la etapa 6 a 9 sufrían marcada corrosión, por lo que también se las recubrió.

La tabla siguiente (56) da los materiales usados en cámaras "flash" y el número de unidades que los usaron.

Materiales para cámaras "flash"	Nº de unidades
Acero, no recubierto	62
Acero, recubierto con resinas epoxi, fenólicas, FRP, caucho clorado	41
Acero, recubierto con placas de acero inoxidable, en las etapas 1 a 9	12
Acero, plaqueado con "Inoxida 90" en las etapas 1 a 4	2
Acero, parcialmente plaqueado con monel	1
Acero, parcialmente plaqueado con cobre-níquel 90/10	1
Cobre-níquel 90/10, sin recubrir	5
Aleación de aluminio (5056) (5,2% Mg, 0,1% Mn, 0,1% Cu)	2

Los soportes de los tubos y los separadores de las cámaras "flash" se construyen generalmente en acero sin recubrir, pero también se usan aleaciones de cobre, 90/10 cupro-níquel, aleaciones de aluminio, Alclad 6061 y 5086, acero plaqueado con inoxidable o cupro-níquel.

Las toberas y orificios para salmuera se construyen en acero al carbono o inoxidable. Los desnebulizadores son generalmente construídos con mallas de monel o de acero inoxidable 316 y 304. También se usan desnebulizadores de cobre, incoloy, aluminio, bronce fósforoso y polipropileno (56).

Generalmente, no se notaron problemas de corrosión en los desnebulizadores empleados, salvo en algunos de monel, si existen sulfuros en el agua de alimentación. El problema más grave es el de los depósitos salinos sobre las mallas y, en general, se prefiere reemplazarlos a limpiarlos con

ácido.

Con respecto a las cámaras de evaporación, el problema de la corrosión es muy grave, y, como ya vimos en el caso de los recipientes para agua, afecta directamente el rendimiento y el costo del agua destilada.

En un informe de la O.S.W. de 1972 (56) se dan los siguientes resultados, con respecto al comportamiento de las cámaras estudiadas: más de la mitad de las unidades mostraron problemas de corrosión, especialmente en plantas que usan tratamiento ácido del agua y altas temperaturas de la salmuera. Veintifres cámaras mostraron muy serios problemas de picado y ataque generalizado, especialmente en las cámaras de las etapas más calientes de la planta.

Otras razones citadas como causantes de la corrosión en las cámaras de evaporación son: ventilación inadecuada de gases no-condensables, excesiva limpieza con ácido, y entrada de aire cuando la planta está fuera de operación.

Las razones por las cuales ciertas plantas (83) mostraron muy baja corrosión en las cámaras de evaporación serían: 1) uso de polifosfato para prevenir incrustaciones, con lo que el pH de la salmuera se mantiene entre 8 y 8,3.- 2) temperatura de la salmuera del orden de 25°C menor que en las unidades que usan tratamiento ácido.

Generalmente, el plaqueado con acero inoxidable o monel de las etapas más calientes, se hizo a posteriori de haberse registrado picado e inclusive se emparcharon con placas de acero inoxidable áreas muy corroídas. Únicamente, el plaqueado se está haciendo durante la construcción de la planta.

Un método apropiado para controlar la corrosión de estas cámaras sería un recubrimiento orgánico y un buen mantenimiento del mismo, como se demostró en muchas plantas que no sufrieron posteriormente corrosión. Tampoco se registraron daños en aquellas unidades construidas en cobre-níquel 90/10. Las plantas de prueba construidas en aluminio no mostraron signos de corrosión o picado en las superficies internas pero sí una leve corrosión en la superficie externa, probablemente debido a las brumas salinas y ambientes industriales.

#### IV.3.f Equipos de deaeración

Las condiciones de trabajo para los materiales de estos equipos son bastantes críticas, ya que el pH del agua de mar se mantiene muy bajo para la eliminación de los carbonatos en forma de anhídrido carbónico.

Existe información (63) de buen comportamiento del acero inoxidable AISI 316 para esas condiciones y en un módulo de prueba construido en California (39) se está usando un equipo de deaeración de acero al carbono.

IV.3. g Bombas

Los componentes principales de las bombas impulsoras son: el rotor, la carcaza y el eje. Cada una de estas partes tiene que trabajar en condiciones bien determinadas y, por lo tanto, se construyen en diferentes aleaciones. En la literatura consultada se encontró que la carcaza puede ser de fundición de hierro y fundición de hierro-níquel (13), bronce (43, 80, 64, 54), o aleaciones de Níquel (Ni-Resist) (79,7). El rotor se construye en acero inoxidable AISI 316 (79, 43, 80, 64, 7); bronce (43, 80, 54) o bronce de aluminio (64).

En el informe de la O.S.W. (56) se publicaron las tablas siguientes sobre diferentes materiales usados en aproximadamente 400 bombas de plantas desalinizadoras MSF estudiadas, especificando en qué servicio se utilizaron tales bombas.

Aleaciones empleadas en rotores de bombas	Nº de bombas			Total
	para agua de alimentación	para recircu- ción de salm.	para agua producto	
Bronce (Sn, Al, P, Pb)	34	49	68	151
Aceros inoxidables (303, 304, 316)	49	47	25	121
Acero inoxidable 420	0	0	4	4
Fundición de aleaciones de acero	6	6	5	17
Hierro fundido	3	3	6	12
Ni-Resist	5	2	4	11
Monel	7	4	4	15
<b>TOTAL</b>				<b>331</b>

Aleaciones empleadas en carcazas de bombas †	Nº de bombas			Total
	para agua de alimentación	para recircu- lación de salm.	para agua producto	
Hierro fundido y fundiciones de hierro-níquel	55	33	53	141
Ni-Resist	31	38	12	81
Bronces (Sn, Al, Pb)	23	31	40	94
Aceros Inoxidables (304, 316, 317)	14	5	7	26
Acero al cromo fundido	0	4	4	8
Acero	1	3	1	5
90/10 cobre-níquel	1	0	0	1
<b>TOTAL</b>				<b>356</b>

Aleaciones empleadas en ejes de bombas	Nº de bombas			Total
	para agua de alimentación	para recircula- ción de salm.	para agua producto	
Aceros inoxidables (303, 304, 316)	67	75	54	196
Acero	9	17	37	63
Monel	21	18	7	46
Acero inoxidable 400	1	2	10	13
Aceros aleados	3	2	4	9
Bronce	1	1	2	4
<b>TOTAL</b>				<b>331</b>

Como podemos ver, para los rotores la elección entre bronce y aceros inoxidables depende del servicio: para agua de alimentación se prefiere acero inoxidable mientras que para las bombas para agua producto se prefiere el bronce. La elección depende del costo, vida útil y costo de reemplazo.

De las 331 bombas estudiadas, solamente 46 rotores fueron reemplazados o reacondicionados por problemas de corrosión, picado y erosión; de ellos el mayor número corresponde a rotores de bronce (especialmente bronce al estaño).

Los rotores de acero inoxidable no presentaron problemas, mientras que los de monel se tuvieron que reemplazar en algunas bombas. Los rotores de hierro fundido y Ni-Resist sufrieron serios problemas de corrosión y cavitación. Con respecto a la carcaza, no está tan sujeta a condiciones severas de corrosión, erosión y cavitación como el rotor, por lo que se usa principalmente hierro fundido en su construcción. Además la carcaza se puede proteger más fácilmente con recubrimientos y plaqueados. Se reemplazaron o sufrieron corrosión y/o erosión 33 carcazas de las 354 bombas estudiadas. Aquí también el mayor porcentaje de problemas se tuvo con carcazas de Ni-Resist (56).

Los ejes de las bombas se construyen principalmente en aceros inoxidables austeníticos, especialmente aquéllos que operan en las condiciones más corrosivas, como ser recirculación de salmuera y agua de alimentación y no presentaron mayormente problemas de corrosión.

#### IV.3.h Tuberías de interconexión

Según el tipo de fluido a transportar, las tuberías pueden ser de acero al carbono (79), fundición de hierro (17,80), acero inoxidable AISI 316 (17), cupro-níquel (80) y no-metálicos (56). Además, se usan aleaciones con o sin recubrimientos.

En la tabla siguiente damos una lista de materiales para tuberías y su distribución para las diferentes aplicaciones (56).

Material de tuberías	Nº de unidades		
	agua de alimentación aereada	salmuera caliente deaereada	agua producto
Acero sin recubrir	35	41	61
Acero recubierto con resina epoxi, caucho o PVC	11	38	3
Acero recubierto con concreto	23	2	4
Acero aluminizado	1	1	1
Acero recubierto con cobre-níquel 90/10	0	1	0
Acero recubierto con "Inoxida 90"	0	2	2
Hierro fundido no recubierto	9	8	8
Hierro fundido con recubrimiento bituminoso	24	0	19
Hierro fundido recubierto con caucho o PVC	1	1	0
Hierro fundido, recubierto con concreto	2	1	0
Cobre-níquel 90/10	6	23	10
Bronce	2	2	0
Acero Inoxidable	2	1	1
Alclad 6061	0	0	2
Plástico reforzado con Fibra de vidrio (FRP)	11	2	5

(continuación)

Material de tuberías	Nº de unidades		
	agua de alimentación aerada	salmuera caliente deaerada	agua producto
PVC	2	1	3
Cemento asbesto	3	0	8
Concreto	2	0	0

#### IV.4 Estudios de otras aleaciones para su utilización en plantas de destilación "flash"

En muchos centros de investigación se están estudiando nuevos materiales, especialmente para los intercambiadores de calor. Las investigaciones van dirigidas a:

- i) búsqueda de aleaciones de menor costo, que reemplazen a las aleaciones de cobre.
- ii) estudio de aleaciones de muy alta resistencia a la corrosión.
- iii) mejoramiento de las aleaciones actualmente en uso.
- iv) optimización de las condiciones de trabajo.

Nosotros nos refererimos aquí, solamente a los puntos i) y ii). Respecto al punto iii) se conocen trabajos sobre: influencia del tamaño de grano, trabajado en frfo (60), y formación de capas protectoras de óxido (40,74). Efecto de la velocidad del agua y de su contenido en oxígeno (13), etc. En cuanto al punto iv) se estudiaron fundamentalmente las condiciones de transferencia de calor. Para ello se probaron perfiles especiales y diferentes rugosidades en los tubos, así como recubrimientos con sustancias hidrófobas tales como siliconas, teflon, metales nobles, etc. (9,19).

##### IV.4.a Aleaciones de hierro (baja aleación)

Estas aleaciones debido a su bajo costo, fueron objeto de numerosos estudios. En ensayos realizados en plantas desalinizadoras, colocando tubos de acero de bajo carbono como intercambiadores, se encontró severa corrosión, especialmente del lado externo de los tubos: Planta de Curacao (64), y evaporadores de "Point Lome", Guantánamo (17).

Togano y col.(82) estudiaron aceros de bajo carbono, en soluciones de cloruro de sodio al 6%. De los datos de velocidad de corrosión en función del pH y temperatura, encuentran que el acero de bajo carbono se comporta muy bien a pH 9,5, si la solución es extremadamente deaerada, pero sufre corrosión por rendijas si entra algo de oxígeno accidentalmente.

Fink y col.(32) usando un circuito de ensayo con agua de mar tratada y bajo contenido de oxígeno (0,05 ppm.) a 120°C, encontraron que los aceros AISI 1010 y "Cor-Ten" sufren severa corrosión.

La O.S.W. (59) patrocinó un trabajo tendiente a encontrar modificaciones del medio, usando inhibidores, que hicieran posible el uso de intercambiadores de calor de aceros de bajo carbono (AISI 1010 ó 1020). Para ello se hicieron ensayos estáticos y dinámicos en agua de mar (pretratamiento ácido y pH ajustado en 7,0-7,5) a 120°C. Se encontró que a bajos niveles de oxígeno es posible controlar la corrosión de tales aceros mediante el uso de una

mezcla de cromato de sodio y fosfato disódico (1 ppm. y 9 ppm. respectivamente). Los autores afirman que el aumento del costo debido a la adición de los inhibidores es bajo (1,86 centavos de dólar /1000 galones). En este trabajo no se estudió la posibilidad de contaminación y toxicidad del agua producto.

#### IV. 4. b Aceros aleados

Otras aleaciones de hierro estudiadas fueron las aleaciones ferríticas de cromo (13) que contienen de 30 a 35% de cromo. Presentaron el fenómeno de corrosión en rendijas en agua de mar aereada (8 ppm. de oxígeno) a temperaturas superiores a 100°C y velocidades de flujo de 2m/seg. También mostraron ataque localizado en defectos de fabricación (rayaduras, etc.).

Estas mismas aleaciones (Fe-Cr) y otras aleaciones más complejas del Fe-Cr fueron ensayadas (62) en agua de mar sintética deaereada a 90°C, encontrándose que las aleaciones más resistentes a la corrosión fueron Fe-Cr-W; Fe-Cr-Mo; Fe-Cr-Mo-Be y Fe-Cr-Mo-Co. También (27) se ensayaron aleaciones de Fe-Al, con relativamente bajo contenido de este último, para su uso en plantas desalinizadoras. Se encontró que las aleaciones de Fe-Al con agregado de Mo (14 a 16% de Al) se comportan igual o mejor que los cupro-níquel en ensayos dinámicos a temperatura ambiente, pero sólo los que contienen 16% de Al se aproximan al comportamiento de los Cu-Ni, con respecto a la corrosión, a temperaturas del orden de 90°C.

Phelps y colaboradores (63) hicieron una revisión sobre la aplicación de aceros inoxidable AISI 304 y 316 en plantas desalinizadoras. Se tomaron como datos experimentales los proporcionados por las probetas de estos aceros colocados en varias zonas de las plantas de desalinización "flash" de Freeport (Texas) y San Diego (California). Encontraron que los factores que más influyen en la corrosión localizada (picado y corrosión en rendijas) de estos aceros son:

- a) concentración de oxígeno disuelto.
- b) temperatura.
- c) velocidad de circulación del agua de mar.

Los dos últimos factores son los responsables de la posibilidad de incrustaciones salinas y, por lo tanto, de los problemas de corrosión en rendijas. Los resultados muestran que el ataque localizado en acero inoxidable se reduce sustancialmente si el contenido de  $O_2$  es muy bajo.

Estos autores encontraron que los aceros inoxidable austeníticos AISI 316 y 304 poseen una sustancial mayor resistencia a la corrosión localizada en agua de mar que los martensíticos AISI 410 y 430. Por otra parte, el AISI 316 es más resistente al picado que el 304, a pH bajo y aún en presencia de oxígeno.

Existen otros factores secundarios que pueden influir en la corrosión localizada, tales como la salinidad, el pH, la composición de la aleación y el efecto de las tensiones. También los macro y los microorganismos presentes en el agua de mar, aceleran la corrosión bajo ciertas circunstancias (53), por lo que los ensayos en circuito cerrado con agua de mar artificial, sólo sirven para orientar en el estudio de las aleaciones ya que es imposible reproducir la microbiología marina y, por otra parte, se aumenta la cantidad de contaminantes, especialmente los que provienen de los fenómenos de corrosión (53).

Otros autores (13) estudiaron el comportamiento de los aceros inoxidables AISI 304L y 316L en agua de mar natural aereada (5,5 ppm. de  $O_2$ ) y deaereada ( $O_2 \leq 0,02$  ppm.), a una velocidad de hasta 2,5 m/seg. y a temperatura de hasta  $150^\circ C$ . Encontraron que, en el sistema aereado, se presenta corrosión en rendijas en las juntas de unión y picado, acompañado por fisuración transgranular, en las superficies internas de los tubos. En ausencia de oxígeno, el ataque se hizo despreciable aún a la máxima temperatura y velocidades de flujo empleado. Por otra parte, Fink y col. (32) encontraron que el acero inoxidable AISI 430 muestra ataque intenso por picado en agua de mar tratada y con bajo contenido de oxígeno (0,05 ppm.) a  $120^\circ C$ , mientras que los aceros inoxidables AISI 304 y 316 sufrieron corrosión bajo tensiones en las mismas condiciones.

También se estudiaron distintos aceros inoxidables mediante técnicas potencioestáticas en agua de mar artificial, deaereada con nitrógeno (22). Se ensayaron las siguientes aleaciones:

18-10 Mo	( 0,021%C; 13,8%Ni; 17,1%Cr; 2,8%Mo; 0,51%Cu)
18-10 Mo Ti	( 0,072%C; 12%Ni; 17,2%Cr; 2,4%Mo; 0,42%Ti; 0,15%Cu)
18-18 Mo Cu	( 0,026%C; 16,9%Ni; 17,6%Cr; 5,7%Mo; 2,9%Cu)

y se encontró que el acero 18-18 Mo Cu (acero super inoxidable) es superior a los demás con respecto a su comportamiento en agua de mar.

#### IV.4.c Aleaciones de aluminio

Debido a su resistencia a la corrosión en atmósferas marinas, su facilidad de trabajado y su bajo costo, ha despertado gran interés la posibilidad del uso de aleaciones de aluminio en las plantas de desalinización. (12, 32, 88, 90). En Wrightsville Beach, Carolina del Norte (USA) está funcionando una planta desalinizadora por destilación (VTE/MSF) íntegramente construida en aluminio (61) así como 2 plantas desalinizadoras MSF, de la Aluminium Co. de América en Peñuelas (Puerto Rico) (56).

En un estudio de aleaciones de aluminio para sistemas de desalinización (87) se diseñó un circuito de prueba, totalmente construido con aleacio-

nes de aluminio, que permite simular las condiciones de trabajo de una planta MSF. En dicho circuito es posible medir: temperatura de trabajo (se trabajó entre 29 y 121°C), concentraciones de salmuera (factores de concentraciones usados de 1; 1,2 y 2,25), condiciones de transferencia de calor, flujo (se trabajó con 2,5; 5,0 y 10,0 pies/seg.)

Se ensayaron las siguientes aleaciones:

3003-H14 (0,12% Cu; 1,2% Mn)  
 5052-H34 (2,5% Mg; 0,25%Cr)  
 5454-H34 (2,7% Mg; 0,8% Mn; 0,1% Cr)  
 6061- T4 (0,25% Cu; 1,0% Mg; 0,6% Si; 0,2% Cr)  
 6063-T832 (0,7% Mg; 0,4% Si)  
 7072 (0,7%Si+Fe; 0,1%Cu; 0,1%Mn; 0,1%Mg; 0,8-1,3% Zn)

empleadas en los siguientes servicios:

Intercambiadores de calor: 3003, 5052, 6063, Alclad 3003/7072

Placas tubo: 5454, 6061

Tuberías: 6061

Luego de un año de uso (88) se encontró que la unidad de prueba de aluminio estaba en excelentes condiciones. Únicamente se verificó ataque en el material de recubrimiento (aleación 7072) de las aleaciones Alclad 3003.

Fauth y Lindberg (30) también ensayaron aleaciones de aluminio en plantas de desalinización. En este caso las plantas utilizadas tenían recipientes de acero al carbono. Se operó durante 21 meses a una temperatura máxima de salmuera de 120°C. Los materiales ensayados fueron: 3003, 5052, 6061, Alclad 3004/7072 y 3003/7072. Encontraron que una causa importante de corrosión fue la ruptura de aislación entre los componentes de acero al carbono y los de aluminio, (corrosión galvánica del aluminio). Además los productos de corrosión del acero, depositados en el exterior de los tubos de aluminio, causan ataque por picado. Según estos autores, la aleación 5052 es la más resistente en salmuera caliente. Parece ser que las aleaciones que contienen magnesio tienen mejor resistencia a la corrosión en este medio, pero existe un límite de contenido de magnesio por encima del cual se produce ataque intergranular. Fauth y Lindberg destacan la necesidad de estudiar la aleación 5050, cuyo contenido de magnesio es levemente inferior al de la 5052. Las aleaciones Alclad 3003/7072 y 3004/7072 no dieron resultados satisfactorios por cuanto el plaqueado de 7072 se consume muy rápidamente.

Otros autores (46) ensayaron las aleaciones 1100, 3003, 5052, 5554 y 6061 hallando también que la 5052 era la más resistente. Destacan la necesidad de ensayos dinámicos y de larga duración.

French y Snodgrass (34) hicieron ensayos de aleaciones de aluminio en circuitos cerrados con salmuera a 126 y 150°C. Encontraron que las aleaciones 3004 y 1235, soldadas con la aleación 4043, tenían un comportamiento satisfactorio en esas condiciones. También encontraron que, para una serie de aleaciones de aluminio, el potencial de electrodo evoluciona a valores más

positivos con el aumento de temperatura de la salmuera.

Otros autores (90) mostraron que el aluminio se comporta casi tan bien como los cupro-níquel, en cicufos de prueba, si se controlan las condiciones de operación.

Sin embargo, en ensayos con agua de mar tratada (libre de carbonos totos y a pH neutro) y bajo contenido de oxígeno (0,05 ppm.) y a una temperatura de 120°C, F.W. Fink y colab. (32) encontraron que las aleaciones de aluminio Alciad 3004 (1,2% Mn; 1% Zn) y 6061 (0,25% Cr; 0,25% Cu; 0,6% Si; 1% Mg; 1% Zn) sufrieron un ataque intenso.

Por contrato con la O.S.W. Lindberg (48) estudió la variación de los potenciales de varias aleaciones de aluminio en agua de mar, en función de la temperatura. Encontró que, por debajo de 60°C y por arriba de 148°C, las aleaciones mostraron un potencial similar pero, en el rango entre las dos temperaturas, existe una diferencia marcada de potenciales que se hace máxima para la temperatura de 120°C, que es justamente la temperatura máxima de las plantas de prueba de desalinización. Comparando dos aleaciones, la 6061 y la 5052, se observa que el potencial de la primera es superior al de la segunda, por lo tanto, tubos de 5052 deberían corroer galvánicamente a placas tubo de 6061, lo que se verificó en la práctica. También demostró el autor que la temperatura tiene una influencia muy superior a la de la velocidad de flujo, en los problemas de corrosión.

Fraker y Rutt (33) estudiaron la naturaleza y comportamiento de las películas de óxido formadas en una serie de aleaciones de aluminio, después de un tiempo de exposición (entre 30 segundos y 1 hora) en agua caliente (3,5% ClNa, pH= 6,7). El rango de temperatura empleado fue entre 100 y 177°C.

Estudiaron las siguientes aleaciones:

5454 H-34 (0,69% Mn; 0,25% Fe; 2,77% Mg; 0,15% Cr)  
 Al-1,52 Mn (1,52% Mn)  
 Al-1,66 Ni (1,6% Ni)  
 6061-T6 (0,51% Fe; 0,66% Si; 0,23% Cu; 1% Mg; 0,22% Cr)  
 2024 (0,6% Mn; 0,50% Fe; 0,50% Si; 4,3% Cu; 0,1% Cr; 1,5% Mg; 0,25% Zn).

Utilizaron técnicas de microscopía electrónica de transmisión y difracción para determinar la morfología y composición de las películas de óxido. El óxido se presenta en dos capas, y los autores encontraron que tanto la iniciación como el crecimiento de la película exterior están determinados por la composición de la aleación y que la resistencia a la corrosión de las aleaciones estudiadas se correlaciona con el retardo en la formación del film externo. Así, la aleación que más lentamente forma el film externo, la 5454, es también la más resistente a la corrosión uniforme y picado de las alea-

ciones estudiadas.

Boisde y colaboradores (13) ensayaron aleaciones de aluminio en un sistema cerrado que permite estudiar el comportamiento de las aleaciones en condiciones de transferencia de calor, con una velocidad de flujo de 1,9 m/seg. El agua de mar empleada fue tratada con ácidos y neutralizada a pH 7. Se emplearon medios aereados (5,5 ppm. O<sub>2</sub>) y deaereado (0,7 ppm. de O<sub>2</sub>). Se encontró que en estas condiciones las aleaciones estudiadas son sensibles al ataque por picado, tanto en el interior como en el exterior de los tubos, pero dicho ataque es mucho menor en los medios deaereados. Además se verificó que los pits son más profundos a temperaturas más elevadas.

Oakes y Wilson (59) estudiaron las modificaciones del medio que hicieran posible el uso de aleaciones de aluminio en intercambiadores de calor. Encontraron que una mezcla de inhibidores, compuesta por 5 ppm. de cromato de sodio y 50 ppm. de bicarbonato de sodio (lo que puede lograrse mediante una eliminación incompleta de los bicarbonatos presentes en el agua de mar) es efectiva para controlar la corrosión. Las aleaciones estudiadas fueron:

1100 (0,12% Cu; 99% Al min.)  
 3003 (0,12% Cu; 1,2% Mn.)  
 5052 (2,5%Mg; 0,25% Cr)  
 5554 (0,8%Mn; 2,8%Mg; 0,1%Cr; 0,1%Ti)  
 6061 (0,6% Si; 0,25%Cu; 1,0%Mg; 0,2%Cr)

Los mejores resultados, en presencia o no del inhibidor y del oxígeno, se obtuvieron con la aleación de aluminio 5052. En ensayos dinámicos realizados en un circuito de prueba con agua de mar sin inhibidor, esta aleación mostró una baja velocidad de corrosión que disminuyó aún más (25 veces) en presencia del inhibidor.

El aluminio 1100 dió muy alta velocidad de corrosión en circuitos dinámicos sin inhibidor, pero esta disminuye mucho en presencia de este último.

El problema que se presenta con el uso de este inhibidor es la posibilidad de depósito de carbonato de calcio sobre las áreas expuestas, que se podría obviar eliminando los iones calcio y magnesio en el agua de mar por intercambiadores iónicos.

#### IV.4.d Otras aleaciones

Con el auspicio de la O.S.W. (42) se está probando una serie de aleaciones resistentes a la corrosión, con vista a su utilización en el sistema de destilación "flash". Estas aleaciones son latones de níquel-aluminio modificados (Ni 3%; Al, Fe, Mn y As < 5%) que tienen la propiedad de formar una película protectora que otorga a la aleación una resistencia mayor a la corro

sión que la de los latones de aluminio arsenicales. Además estas aleaciones son endurecibles por envejecimiento.

Niederberger y colaboradores (57) estudiaron 22 aleaciones comerciales de níquel para evaluar su comportamiento con respecto a la corrosión en agua de mar. El uso de aleaciones de níquel en agua de mar es cada día mayor debido a su resistencia a los efectos de turbulencia y velocidad, (corrosión-erosión). Sin embargo en agua de mar estática el níquel puro y aleaciones de Ni pueden sufrir ataque severo.

Se estudiaron aleaciones de: níquel-berilio; níquel-cobre (30-50% de Cu); níquel-cromo; níquel-molibdeno y níquel-cromo-molibdeno; con agregados de otros aleantes en cantidades menores. Encontraron que las aleaciones de Ni-Cr-Mo son las que tienen mayor resistencia al picado y corrosión en rendijas.

También se estudió el efecto de aleantes en el titanio en agua de mar (31), estudiando el potencial de ruptura de la pasividad. Se encontró que el Ni y el Mo aumentan tal potencial mientras que el Fe y Al lo bajan. En soluciones de salmuera a 200°C las aleaciones de Ti-2% Ni tienen una buena resistencia a la corrosión bajo tensiones. Esta buena resistencia se debería a la presencia de una segunda fase en la microestructura ( $Ti_2Ni$ ) que se disolvería protegiendo al resto del material.

V. TIPO DE MATERIALES USADOS EN LA CONSTRUCCION DE OTROS SISTEMAS DE DESALINIZACION

Generalmente, las plantas desalinizadoras tienen muchos materiales de construcción en común y lo que varía son las condiciones de trabajo. Para esta reseña nos basaremos fundamentalmente en el trabajo sobre comportamiento de materiales realizado por la O.S.W. (Department of the Interior) (56) y publicado en marzo de 1972.

V.1 Destilación por tubos verticales (VTE)

Los materiales empleados (salvo muy pocas excepciones) son del mismo tipo que los empleados en la planta MSF y su comportamiento es similar.

V.1.a Tubos intercambiadores de calor y verticales

Para las 12 plantas que utilizan el sistema VTE, de película ascendente, tenemos la siguiente distribución de aleaciones:

Tubos verticales:

Aleación:	Nº de unidades
latón de aluminio	9
latón 70/30	1
latón almirantazgo	2

Tubos intercambiadores de calor:

Aleación:	Nº de unidades
70/30 Cu-Ni	9
70/30 Latón	1
latón almirantazgo	2

En el sistema VTE de película descendente (planta prototipo de Freeport, Texas), se emplean: en los tubos verticales e intercambiadores de calor: latón de aluminio; 90/10 Cu-Ni; latón almirantazgo; titanio; acero inoxidable 316L, cobre-Fe-P (CDA 194).

No se encontraron fallas en los tubos verticales ni en los intercambiadores de calor de: Cu-Ni 90/10; acero inoxidable 316L, titanio, CDA 194. Tubos de latón de aluminio se reemplazaron debido a corrosión bajo tensiones y no debido a perforación por corrosión-erosión. En general, los latones de aluminio y aleaciones de cobre-níquel mostraron igual comportamiento que en las plantas MSF. Los tubos de acero al carbono y latón almirantazgo sufrieron

gran corrosión en salmuera caliente.

#### V.1.b Efectos verticales, recipientes para agua, tuberías, etc.

Practicamente todos se construyeron en acero o hierro fundido, recubiertos o no con resinas epoxi o revestimientos bituminosos o plaqueado con 70/30 Cu-Ni, monel, acero inoxidable, etc. Los desnebulizadores se construyeron en acero inoxidable.

En la planta de Freeport se usó originalmente acero al carbono para los evaporadores, recipientes para agua, placas tubo y tuberías. También se colocaron algunos tubos verticales e intercambiadores de calor de acero al carbono pero sufrieron seria corrosión y se reemplazaron por aleaciones más resistentes.

#### V.2 Electrodialisis (ED)

Las membranas son el material de mayor costo que se utiliza en estas plantas y además sufren fácilmente percances.

Los ánodos son de: grafito, acero inoxidable 316, titanio y tantalio recubiertos con platino. Los cátodos son generalmente de acero inoxidable o titanio platinizado.

Los soportes y estructuras se construyen de acero al carbono con o sin recubrimientos plásticos o de caucho. También se usa polipropileno. Tuberías de acero recubierto, de cobre o plástico se usan en el agua de alimentación y producto. Se nota una tendencia a reemplazar el acero por tuberías de PVC. Las bombas impulsoras son generalmente de bronce o latón, aunque se usaron también bombas de acero al carbono con carcasa de hierro fundido. Las tuberías metálicas mostraron ataque y se tiende a reemplazarlas con tubos de PVC que no sufren fallas.

Se encontró picado en los ánodos de titanio platinizado, en los que el platino se depositó químicamente, pero no se encontró picado en aquellos recubiertos con platino por electroplaqueado.

#### V.3 Osmosis inversa

Aquí también las membranas constituyen la parte más costosa entre los materiales que componen la planta. En todos los casos las delgadas membranas semipermeables deben ser soportadas por estructuras auxiliares, para resistir las altas presiones a las que están sometidas.

Existen pocos problemas de materiales en estas plantas ya que se usan recipientes para agua no metálicos y, además, el agua de mar se usa a temperatura ambiente. Uno de los pocos problemas de corrosión se verificó en los soportes tubulares de aluminio que mostraron un intenso picado en la parte

exterior y en las uniones. El aluminio anodizado, así como las tuberías de fibra de vidrio reforzado con resinas epoxi, no presentan estos problemas pero encarecen mucho el costo de la planta. Otras piezas críticas en estas plantas son las bombas de alta presión. Se emplearon bombas centrífugas de alta velocidad, contruñas en acero inoxidable 316 y bombas tipo pistón, estas últimas fueron contruñas con un cilindro de hierro fundido recubierto con cerámico y pistón de acero inoxidable 304 o de bronce de aluminio y pistón de aleación Colmonoy. En ambos casos hubo problemas, ya sea por falla en el cilindro de hierro fundido o por picado de los pistones de Colmonoy. Las tuberías son todas de PVC o acero inoxidable y no presentaron problemas.

#### V.4 Destilación por compresión del vapor

Desde 1963 existe una planta prototipo de 1 millón de galones /día (3.800 m<sup>3</sup>/día) en Roswell. Debido a corrosión de los materiales y fallas mecánicas de equipos, la planta necesitó cerrar con frecuencia para reparaciones y mantenimiento.

En la planta original todos los tubos intercambiadores de calor se fabricaron de latón de aluminio arsenical. En general tuvieron un buen comportamiento, mostrando apenas algo de corrosión intergranular. Un problema serio fue el taponamiento de los tubos intercambiadores por productos de corrosión provenientes de la cámara de vapor de acero y de las placas-tubo, también de acero.

El mayor problema de corrosión se encontró en los tubos de latón de aluminio en la zona de calentamiento del agua de alimentación, debido a que estuvieron expuestos a agua salobre aereada a temperaturas entre 50-60°C. Se reemplazaron con tubos de cobre-níquel 90/10. Todas las otras partes de la planta se construyeron en acero al carbono. Se encontró corrosión en todas las piezas de acero en contacto con salmuera caliente y fue éste el problema más grave de la planta (productos de corrosión que taponaron intercambiadores sumado al daño de la corrosión en los componentes).

Muchas partes en acero se reemplazaron: tuberías, condensadores, recipientes para agua, etc. Se recomendaron recubrimientos orgánicos o plaquados con aleaciones resistentes a la corrosión.

Los problemas encontrados en esta planta, causados por la corrosión del acero en salmuera caliente y acelerado por la presencia de cuplas galvánicas, ilustran la importancia de la selección del material para cada componente durante el diseño de la planta.



## VI.-

## BIBLIOGRAFIA

- 1- Adar, J. IAEA, Viena 1971 (20347).
- 2- Adar, J. 4th. U.N. Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy Ginebra 1971 (20120-20349).
- 3- Agostini, J.P. Rapport CEA-R 42-61, 1972 (20639).
- 4- Alvarez, G., Galvele, J.R. 1a Reunión Latinoamericana de Electroquímica, La Plata, agosto 1972 (20847).
- 5- Alvarez, G., Galvele, J.R. "Mecanismo de picado de cinc, efecto de pequeñas concentraciones de aleantes". En desarrollo.
- 6- Bados, J.M. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UNBA., comunicación personal.
- 7- Bailie, R.E., Tuthill, A.H., Todd, B. Corrosión y Protección, 3 (Nº 2), 19, 1972 (20891).
- 8- Balligand P., Agostini, J.P., Huyghe, J., Lauro, F., Vignet, P. BIST Nº 133, pag. 5, 1969 (20338).
- 9- Balligand P., Huyghe, J., D'Orival, M., Vignet P. Intern. Conf. on Water for Peace, Washington 1967 (20112).
- 10- Balligand P., Huyghe, J., Lauro, F., Vignet, P. 4th UN Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Ginebra 1971 (20145).
- 11- Baker Jr., R.A. Westinghouse Electric Corporation Puraque Conference, Roma 1969 (20587).
- 12- Behrens, H.C., Osborn, O., Rice, L., Schrieber, C.F., Webb, B.P. O.S.W. -PR-623, 1970 (20001).
- 13- Boisde, G., Coriou, H., Grall, L., Mahieu, C., Peiras, M. 3rd. Intern. Symp. on Fresh Water from the Sea, vol. 1, pag. 579 1970 (20490).
- 14- Boden, P.J., Corrosion Sci., 11, 353, 1971 (20296).
- 15- Boden, P.J., Corrosion Sci., 11, 363, 1971 (20297).
- 15\*- Rotteri, A.B. Saneamiento, O.S.N., año XXXIV, Nº218, p.157 (1970).
- 16- Brouee, R. Intern. Conf. on Water for Peace, Washington 1967, (20899).
- 17- Checkovich, A., Brodsky, J., Proceedings 24th. Conference NACE Cleveland, Ohio, marzo 1968, (20892).
- 18- Cohen, A., Rice, L. Material Protection, december 1969, p.67(20075).
- 19- Courvoisier, P., Guillermin, R., Haman, M., Muratore, E., Vignet, P. BIST Nº 133 (1969), (20340).
- 20- Cragnolino, G., Galvele, J.R. 1ra. Reunión Latinoamericana de Electroquímica, La Plata, agosto 1972 (20848).
- 21- DeCastro, M.A.C., Galvele, J.R. 1ra. Reunión Latinoamericana de Electroquímica, La Plata, agosto 1972 (20849).
- 22- Defranoux, J.M. Corrosion Sci., 8, 245, 1968 (20250).

- 23- De Micheli, S.M.de., Galvele, J.R. Metalurgia, 1971, 27, agosto, p.589 (20845).
- 24- De Micheli, S.M.de., Galvele, J.R. V Jornadas Metalúrgicas de la SAM, setiembre 1972 (10619).
- 25- Desensy, M.G.J. Chemical Engineering, Junio 15, pag.182, 1970 (20026).
- 26- Douvry, R., Hanf, H. 3rd. International Symposium on Fresh Water from the sea, Yugoslavia, vol.1, p. 81, 1970 (20336).
- 27- Duffy, E.R., Nachman, J.F., US Report of Interior, Washington, Dec. 1970, p.64, O.S.W. PR-626 (20562).
- 28- Durante, R.W. "Nuclear Desalination", IAEA (1969), p.169 (20440).
- 29- Ennis, C.E., Gelblum, G., O.S.W., R & D Prog.Rept. N° 554, marzo 1970 (20613).
- 29\*- Eissenberg, D.M., Littlefield, C.C., Hammond, R.P., Read, S.A. Spievak, Proc. 3rd. Int. Symp. of Fresh Water from Sea, Yugoslavia 1970, p.479 (20598)
- 30- Fauth, D.A., Lindberg, R.I., O.S.W. Report N° 583, agosto 1970 (20649).
- 31- Feige, N.G. "Nuclear Desalination", IAEA (1969), p.815 (20485).
- 32- Fink, F.W., White, E.L., Boyd, W.K., O.S.W. R&D Prog. Report N° 225, 1966, (20633).
- 33- Fracker, A.C., Rulf J & A.W. Corrosion, 27, 151, 1971 (20221).
- 34- French, W.H., Snodgrass, J.S., O.S.W. Report N° 688 (1971) (20895).
- 35- Galvele, J.R., De Micheli, S.M.de, Corrosion Sci. 1970, 10, p,795, (20844).
- 36- Galvele, J.R., De Micheli, S.M.de., Müller, I.L., Wexler, S.B.de., Alanis, I.L.- U.R, Evans Intern.Conf. on Localized corrosion, december 1971, Williamsburg, Virginia (765).
- 37- Galvele, J.R., Semino, C.J., II Simposio Sul-Americano de Corrosao Metalica, Guanabara, Brasil, Noviembre 1971 (935).
- 38- Galvele, J.R., Wexler, S.B.de., 142nd. National Meeting of the Electrochemical Society, Miami Beach, Florida, octubre 8-13, 1972 (20850).
- 39- Gardner, W.A. "Nuclear desalination", IAEA, p.127, 1969 (20438).
- 40- Howes, M.A.H., Bright, A., Johnson, K., Noless, R.K., Wibel, R. Washington, US Dept. of Interior, december 1970, OSW PR-628 (20563).
- 41- IAEA "Desalination of water using conventional and nuclear energy", Viena 1964, T.R. N° 24 (20889).
- 42- Iron Age, p.49, diciembre 1969 (20082).
- 43- Jemma, M., Intern. Conf. on Water for Peace, Washington 1967(20437).
- 44- Katz, W.E., Intern.Conf. on Water for Peace, Washington 1967(20898).

- 45- Laban, H., Hohenhinnebusch, W. "Nuclear Desalination", IAEA (1969) p.93 (20436).
- 46- Legault, R.A., Bettin, W.J., Mat.Prot.Perfm., 10, (3), 1971 (20634).
- 47- Levite, G.A., Adar, J., "Desalination in Israel", 1971 (20351).
- 48- Lindberg, R.I. Mater. Protec.Perform., 11 (1972) (2), p.45 (20785).
- 49- Light Metal Age, June 1968, 26, (5-6) p.24 (20556).
- 50- Lonsdale, H.K., Merten, U., Intern.Conf.on Water for Peace, Washington 1967 (20166).
- 51- Matz, R. Intern.Conf. on Water for Peace, Washington 1967 (20897).
- 52- Mawer, R.A., Intern.Conf. on Water for Peace, Washington 1967.
- 53- Meany Jr., J.J. Mater.Protect., oct.1969, (8,10) p.27 (20006).
- 54- Montecatini Edison, Copper 4, 6, 1971 (20896).
- 55- Müller, I.L., Galvele, J.R. "Efecto de aleantes sobre el mecanismo de picado del aluminio". En desarrollo.
- 56- Newton, E.H., Birkett, J.D., Ketteringham, J.M., OSW Contract 14-30-2721, 1972 (20637).
- 57- Niederberger, R.B., Ferrara, R.J., Plummer, F.A. Materials Protection and Performance, vol.9 N° 8, agosto 1970 (20188).
- 58- Noguchi, N., Sato, S., Imatake, T., Matsubara, T., Hamada, T. "Nuclear Desalination", IAEA 1969, p.879 (20489).
- 59- Oakes, B.D., Wilson, J.S. "Sea water corrosion control by environment modification", OSW, enero 1971.
- 60- O.S.W. "Saline Water Conversion Report", 1967 (20893).
- 61- O.S.W. "Saline Water Conversion Report", 1970/71 (20894).
- 62- Pessall, N., Hull, F.C., Liu, C. R&D Prog. Report, Dec. 1970, p.83 (20641).
- 63- Phelps, E.H., Jones, R.T., Leckie, H.P. Journ of the Electroch.Soc., 116, 213C, 1969 (20427).
- 64- Querns, W.R., "Nuclear Desalination", IAEA 1969 p.77 (20428).
- 65- Quintela, R.M. Intern.Conf. on Water for Peace, Washington 1967, (20901).
- 66- Quintela, R.M. Ciencia y Técnica, V.133 N°675, p.380, 1964 (20348).
- 67- Quintela, R.M., Clifton, G. "Informe sobre destiladores solares" (Subsidio N° 2393, C.N.I.C.T.).
- 68- Quargnolo, J. "Atlas del potencial argentino", Ed. Estrada 1972
- 69- Ramey, J.T., Hammond, P.R. 4th. Intern.Conf. PUAE, Ginebra 1971 (20124).
- 70- Rotstein, E., Capiati, N.J., Lasa de, H.I. (1969) en publicación
- 71- Rotstein, R., Urbicain, M.J. comunicación personal.
- 72- Savage, F.W. "Water Resources Research", v.6, No5, october 1970, p.1449 (20789).
- 73- Semino, C. "Corrosión bajo tensiones del acero AISI 4340 en agua de mar" Tesis, Fac.Ciencias Exactas y Naturales, UNBA.1972 (20-900)

- 74- Serro, J., Laureys, J. Corrosion Sci. 5, 135 (1965) (20309).
- 75- Sieder, E.M., Spiewak, I. "Nuclear Desalination", IAEA 1969 (20486).
- 76- Slovka, E.H., Spiewak, I. 4th. Intern. Conf. on the PUAE, Ginebra 1971 (20172).
- 77- Silver, R.S. Desalination, 9, 3, 1971 (20596).
- 78- Sweelt, F., Smith, R.R., Casamento, P., Taylor, R.N. Desalination, 8 (1970), p.167.
- 79- Steinbruchel, A.B. "Nuclear Desalination", IAEA (1969) p.525 (20466).
- 80- Suarez, J., El-Saie, M.H.A. "Nuclear desalination", IAEA (1968), p.239 (20445).
- 81- Tidbull, R.A., Gaydos, J.G. "Nuclear desalination", IAEA (1969), p.495 (20464).
- 82- Togano, H., Sasaki, H., Kanda, Y., Ozato, K., Nakauchi, H. 5-ICME (20890).
- 83- U.N. "Solar distillation as a means of meeting small scale water demands", New York 1970 (20652).
- 84- U.N. "Water Desalination in developing countries", New York 1964, p.325 (20655).
- 85- U.N. "Nuclear desalination", IAEA (1969), p.145 (20888).
- 86- UKAEA. "La desalinización ante los problemas de abastecimiento de agua", Inglaterra, 1970 (20888).
- 87- Verink Jr., E.D. Mater. Protect., Nov.1969, 8, (11), p.13 (20078).
- 88- Verink Jr., E.D. Corrosion, 1971, paper N° 60 (20663).
- 89- Vitoria Neto, P., Galvele, J.R. "Mecanismo de crevice corrosion", En desarrollo.
- 90- Wakefield, B.D. Iron Age Metal Working Intern., p.33, June 1970, (20228).
- 91- Weisntein, S., Galvele, J.R. "Efecto de la temperatura sobre la corrosión de aleaciones de aluminio en solución de cloruro de sodio", En desarrollo.
- 92- Wexler, S.B.de., Galvele, J.R. "Corrosión bajo tensiones de aleaciones de aluminio-magnesio". En desarrollo.
- 93- Zossi, A., Morales, A., De Micheli, S.de., Biloni, H. "Corrosión de estructuras de solidificación de aleaciones binarias de aluminio". En desarrollo.