

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTIN
Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson



DISEÑO DE PLANTA DE PURIFICACIÓN DE AGUA PARA UN REACTOR
LWR AP1000, A PARTIR DE AGUA DE RÍO

Tesina de Especialización en Reactores Nucleares
Y su Ciclo de Combustible

Alumno: Ing. Renzo Crispieri
Director de Tesina: Dr. Mauricio Chocrón
Co Directora de Tesina: Inga. Ivanna Rodríguez

Buenos Aires - 2009



Tabla de Contenidos

1	Introducción.....	4
2	Características de una central PWR.....	5
3	Reactor nuclear AP1000 (Westinghouse).....	7
4	Calidad del agua del reactor AP1000.....	10
5	Características del agua de alimentación.....	11
6	Estimación de consumo de agua de la central nuclear.....	14
6-1	Circuito primario.....	15
6-2	Circuito secundario.....	15
6-3	Sistemas auxiliares.....	15
6-4	Solución de boro.....	15
6-5	Pruebas preoperacionales.....	15
6-6	Purgas de los generadores de vapor.....	15
6-7	Remoción de calor residual.....	15
6-8	Consumo en operación.....	16
7	Diseño del proceso de tratamiento de agua.....	17
7-1	Inclusión de aditivos.....	17
7-1-1	Coagulación.....	18
7-1-2	Floculación.....	18
7-2	Decantación.....	18
7-3	Filtro de lecho.....	19
7-4	Carbón activado.....	20
7-5	Membrana de ósmosis inversa.....	20
7-6	Resina catiónica débil.....	21
7-7	Resina catiónica fuerte.....	21
7-8	Desgasificador por vacío.....	22
7-9	Resina aniónica débil.....	23
7-10	Resina aniónica fuerte.....	24
7-11	Lecho mixto.....	24
8	Diseño de equipos principales del tratamiento de agua.....	27
8-1	Equipo de ósmosis inversa.....	27
8-2	Resinas de intercambio iónico.....	27
8-2-1	Columna catiónica débil.....	28
8-2-2	Columna catiónica fuerte.....	28
8-2-3	Columna aniónica débil.....	29
8-2-4	Columna aniónica fuerte.....	29
8-2-5	Lecho mixto.....	29
9	Conclusiones.....	30
	Referencias bibliográficas.....	32
	Anexos.....	33
	Anexo 1: Cálculo de equivalentes.....	34
	Anexo 2: Cálculo de los volúmenes y caudales de agua.....	35
	Circuito primario.....	35
	Circuito secundario.....	35
	Sistemas auxiliares.....	35
	Solución de boro.....	36
	Purga de los generadores de vapor.....	36
	Remoción de calor residual.....	36
	Consumo en operación.....	36
	Anexo 3: Procedimiento de cálculo para las resinas de intercambio iónico.....	37
	Anexo 4: Membrana de ósmosis inversa.....	38
	Anexo 5: Resinas de intercambio iónico.....	40
	Anexo 6: Alternativa de funcionamiento usando agua de mar.....	44

<u>Descripción del sistema de potabilización de agua de mar.....</u>	<u>45</u>
<u>Operación del sistema.....</u>	<u>45</u>
<u>Descripción del Sistema de Tratamiento de Agua Desmineralizada.....</u>	<u>45</u>
<u>Anexo 7: Biocidas y floculantes para agua de mar.....</u>	<u>48</u>

1 Introducción

El presente trabajo de Tesina tiene por objetivo el desarrollo de una planta de tratamiento de agua desmineralizada para un reactor de potencia AP1000 de Westinghouse, considerando sus requisitos operacionales.

La planta desmineralizadora debe proveer la cantidad de agua suficiente para reponer los consumos del circuito primario de refrigeración del reactor, así como para los sistemas auxiliares de la planta y para la preparación correcta de la solución de ácido bórico usado como veneno quemable en este tipo de reactores.

También se requiere agua desmineralizada para llenar el circuito secundario y reponer el agua perdida por fugas y purgas de los generadores de vapor.

2 Características de una central PWR

Un reactor de agua a presión (por sus siglas en inglés PWR: Pressurized Water Reactor), es un tipo de reactor nuclear que usa agua liviana como refrigerante y moderador de neutrones.

En un PWR, el circuito primario de refrigeración está presurizado con el fin de evitar que el agua alcance su punto de ebullición, de aquí el nombre de este tipo de reactores. El PWR es uno de los tipos de reactores más utilizados a nivel mundial. Hay más de 230 reactores tipo PWR en uso para la generación de energía eléctrica. En la figura 1 se presenta un esquema simplificado de este tipo de reactores.

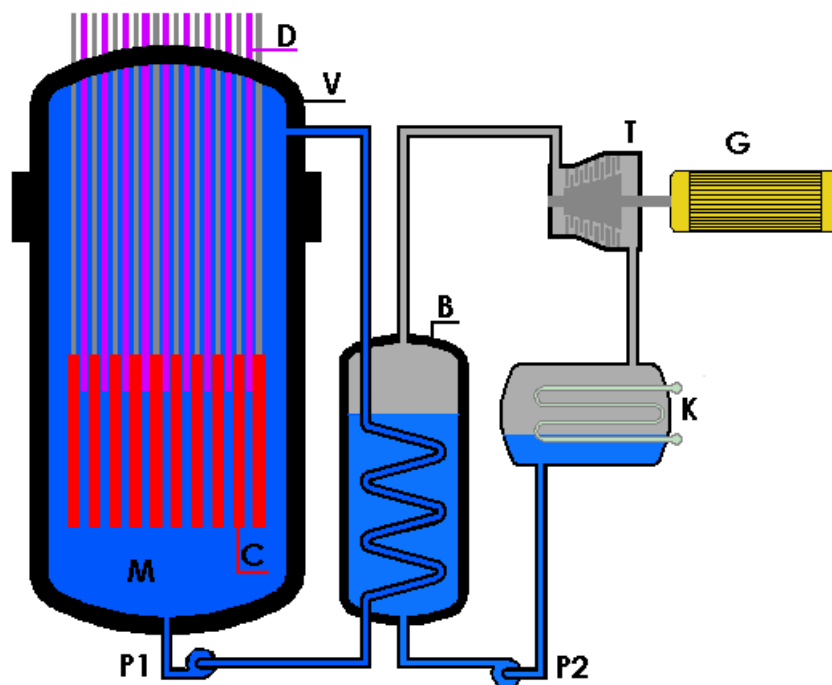


Figura 1: Esquema de un PWR

El combustible nuclear (C) calienta el agua del circuito primario. El agua calentada, se bombea (P1) hacia un generador de vapor (B), en donde el calor del agua del circuito primario se transfiere hacia el agua del circuito secundario para convertirla en vapor. La transferencia de calor se lleva a cabo sin que el agua de los circuitos primario y el secundario se mezclen (al igual que en otros intercambiadores de calor) ya que el agua del circuito primario es radiactiva, mientras que es necesario que el agua del secundario no lo sea. El vapor que sale del generador de vapor se utiliza para mover una turbina (T) que a su vez mueve un generador eléctrico (G) que está conectado a la red de distribución eléctrica. Luego de que pasa por la

turbina, el vapor cambia de fase en un condensador (K) donde se tiene nuevamente agua líquida que es bombeada (P2) hacia el generador de vapor para iniciar otro ciclo. El condensador es enfriado por un tercer circuito de agua llamado circuito terciario.

Se tienen dos características distintivas de los reactores de agua presurizada (PWR):

1. En un PWR, hay tres circuitos de refrigeración (primario, secundario y terciario), que utilizan agua liviana. Es necesario que el agua de los circuitos primario y secundario sea desionizada para reducir la corrosión y la activación innecesaria de sustancias en el interior de estos sistemas.

2. La presión en el circuito primario es típicamente de 16 MPa, que es una presión notablemente más alta que en otros reactores nucleares. Como consecuencia de esto, la temperatura de ebullición del agua se aumenta a un valor tal que se garantiza que el agua del circuito primario no se evapore durante la operación normal del reactor. Normalmente el circuito secundario se encuentra a una presión menor que el primario. Cuenta con turbinas de alta y baja presión, un condensador, que se encuentra en vacío, y luego un tren de precalentadores, previo a la bomba de alta presión, la cual inyecta el agua del circuito secundario a la presión de operación del generador de vapor.

3 Reactor nuclear AP1000 (Westinghouse)

Para esta tesina se ha elegido el reactor AP1000 de Westinghouse dado que es un reactor PWR (el tipo más comúnmente usado para la generación de energía eléctrica a nivel mundial) y que no requiere insumos adicionales como agua pesada para su funcionamiento. Esto hace que sea el tipo de reactor que más probablemente sea elegido por un país que no posee plantas de producción de agua pesada ni otros reactores nucleares de potencia instalados, como es el caso de Chile.

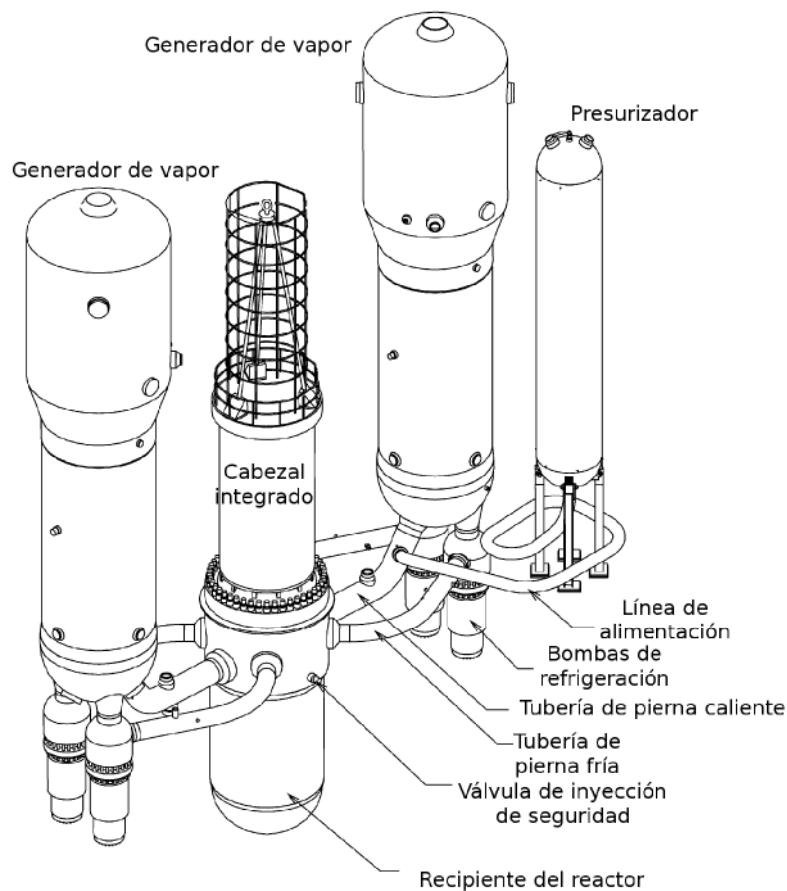


Figura 2: Sistema de refrigeración del AP1000 [\[TLS01\]](#)

El reactor AP1000 es un PWR con mejoras producidas gracias a la experiencia de Westinghouse en la construcción de reactores nucleares. La compañía lo cataloga como un reactor de generación III+, por su diseño de seguridad pasiva que requiere poca intervención de los operadores y diseños más simples y económicos. En la siguiente figura se presenta un esquema del reactor con los sistemas de seguridad asociados.

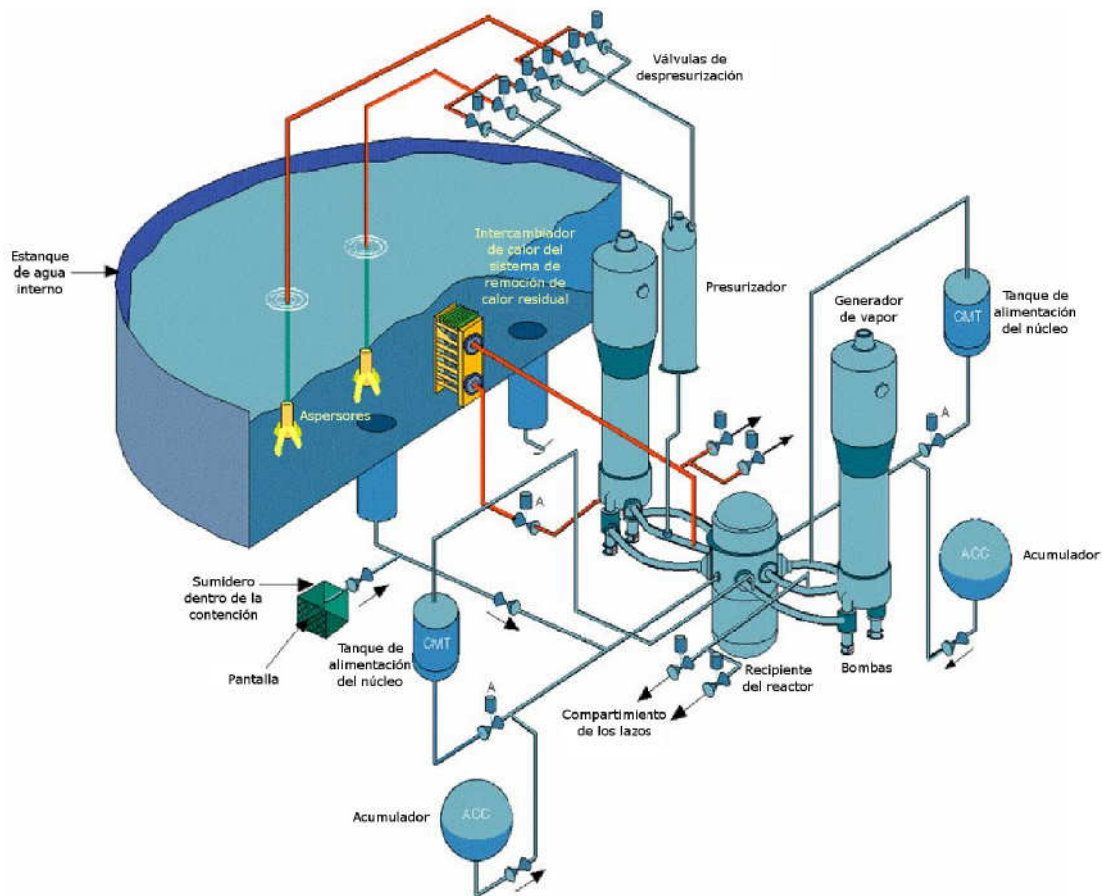


Figura 3: Sistema pasivo de enfriamiento del núcleo [\[TM01\]](#)

Este sistema incorpora cuatro sistemas de refrigeración del núcleo en caso de un accidente de pérdida de refrigerante:

1. Los acumuladores, que proveen un alto flujo durante varios minutos
2. Los tanques de alimentación del núcleo, que proveen un flujo relativamente alto durante un tiempo mayor
3. El tanque de almacenamiento de agua de realimentación dentro de la contención, que provee un flujo menor por un tiempo mucho mayor
4. Recirculación de agua de la contención. Se inicia cuando la línea de válvulas de recirculación se abre y el nivel de inundación es suficientemente alto.

El tanque de almacenamiento de agua de realimentación dentro de la contención es una fuente de baja presión que inyecta sólo después que el sistema de refrigeración del núcleo está despresurizado por el sistema de despresurización automática [\[TLS01\]](#).

Este reactor es capaz de producir 3415 MW térmicos que corresponden a 1117 MW eléctricos. Para esto cuenta con 2 generadores de vapor. Asimismo emplea 157 elementos combustibles y

puede quemar hasta 50% de combustible MOX (mezcla de uranio natural y plutonio). Además, utiliza un sistema de construcción modular que permite acortar los tiempos necesarios para tener el reactor preparado para comenzar la operación [{TLS01}](#) [{TM01}](#). En la siguiente tabla se presentan los datos técnicos del reactor [{APW01}](#).

Parámetros	Valor
Potencia térmica	3400 MWt
Eficiencia de la planta (bruta/neta con torres de enfriamiento)	35,1% / 32,7%
Núcleo	
Enriquecimiento del combustible	< 4,95%
Refrigerante	Agua liviana
Número de tubos por generador de vapor	10000
Duración del ciclo de operación	18 meses
Porcentaje del combustible reemplazado en la recarga	43,00%
Parámetros de la contención	
Presión de diseño	0,5 MPa
Temperatura de diseño	343.3 °C
Temperatura de la pierna fría	280,56 °C
Presión de diseño	17,3 MPa
Flujo por loop	35772.14 m ³ /h
Temperatura de diseño	315,56 °C
Presión de diseño del sistema principal	8,27 MPa
Flujo de alimentación	6790,28 Ton/h
Desechos generados anualmente	
Desechos de nivel medio (resinas agotadas, filtros, etc) y de nivel bajo (compactables/no compactables)	35 ton métricas

Dado que el AP1000 es un reactor PWR se requiere agua liviana desmineralizada para sus circuitos primario y secundario, y una vez que estos circuitos estén llenos, será necesario mantener una producción de agua suficiente para reponer las pérdidas en estos sistemas y suministrar el agua necesaria para otras operaciones de rutina del reactor. Por lo tanto, en los siguientes capítulos se discutirá la calidad que debe tener este agua (parámetros químicos adecuados) y el tratamiento apropiado para la obtención de la misma.

4 Calidad del agua del reactor AP1000

La calidad del agua producida debe cumplir con los requisitos indicados en la siguiente tabla:

Parámetros	Unidad	Valor normal	Inicio de acciones
Conductividad específica a 25°C	μS/cm	≤0,10	≤0,20
Sílica activa	μg/L	≤9,99	≤19,98
Sílica total	μg/L	≤49,94	
Sólidos suspendidos	μg/L	≤49,94	
Aluminio	μg/L	≤19,98	
Calcio	μg/L	≤4,99	
Magnesio	μg/L	≤4,99	
Cloruros	μg/L	≤1,00	
Sulfatos	μg/L	≤1,00	
Carbono total orgánico	μg/L	≤99,89	

Estos parámetros están definidos en la descripción del reactor [{NRC01}](#). Esta calidad de agua busca cumplir con objetivos particulares que son:

- 1.Optimizar el control, evitando que las sustancias disueltas se activen al pasar por el núcleo del reactor, aumentando el inventario radiactivo en los sistemas.
- 2.Minimizar la velocidad de corrosión de las estructuras internas.
- 3.Reducir la deposición de contaminantes sobre las superficies de transferencia de calor.
- 4.Controlar la formación de oxígeno producido por radiólisis.
- 5.Mantener las propiedades apropiadas del agua en todas las condiciones de operación.

Para cumplir estos objetivos [{VGB01}](#) a lo largo del tiempo se requiere, aparte de la planta de tratamiento de agua, una de purificación que se encargue del tratamiento del agua, tomando una porción del agua de los sistemas, purifique las impurezas acumuladas durante la operación y la retorne dentro de las especificaciones. El diseño de esta última planta no está contemplado dentro de la presente tesina.

5 Características del agua de alimentación

El agua se tomará a partir del río Loa de la segunda región de Chile. Este río se encuentra cerca de una de las zonas mineras más importante del país, por lo que sería una elección lógica ubicar una central nuclear en esta área. Se considera la calidad del agua en la desembocadura del río, donde su calidad está más deteriorada [{DGA01}](#). Esto para asegurar un sumidero frío considerando el agua del mar para tal efecto.

Parámetros	Unidad	Valor normal
Conductividad específica a 25°C	µS/cm	18718
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L	8,80
RAS		26,80
Cloruros	mg/L	6102,00
Sulfatos	mg/L	2015,90
Sulfuros	mg/L	5,00
Boro	mg/L	90,00
Cobre	µg/L	104,00
Cromo	µg/L	30,00
Hierro	mg/L	4,75
Manganeso	mg/L	1,14
Molibdeno	mg/L	0,13
Cinc	mg/L	7,90
Aluminio	mg/L	2,74
Arsénico	mg/L	4,40
Sólidos disueltos	mg/L	6290,00
Sólidos suspendidos	mg/L	108,00
Selenio	µg/L	5,30
Plomo	mg/L	0,02
Nitritos	mg/L	12,00

La calidad del agua conseguida proviene de una fuente orientada principalmente a usos agrícolas, lo cual explica la presencia del parámetro RAS (descrito en el siguiente párrafo) en lugar de las concentraciones de Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} expresadas directamente y la falta de la concentración de bario, el cual tiene un efecto negativo en la vida útil de las membranas de ósmosis inversa, debido a incrustaciones que produce en éstas. Para extender la vida útil de las membranas puede ser necesario ablandar el agua, removiendo el Ca^{+2} y el Ba^{+2} .

RAS es la relación de absorción de sodio. Es un factor utilizado en estudios agrícolas, porque un alto valor de RAS puede afectar negativamente la productividad de los suelos [RAS01]. Si bien este factor considera las concentraciones de iones de Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} (expresadas en eq/L), no permite determinarlos independientemente. Se determina por la ecuación:

$$RAS = \frac{[Na^{+1}]}{\sqrt{\frac{[Ca^{+2}] + [Mg^{+2}]}{2}}}$$

Como comparación con el agua del río Paraná podemos establecer la siguiente comparación de algunos parámetros, sólo los más importantes para dar una idea de cómo va cambiar el sistema de tratamiento con respecto a los usados en Argentina:

Parámetros	Río Loa		Río Paraná		
	Unidad	Valor normal	Unidad	Min	Max
Conductividad eléctrica (25°C)	µS/cm	18718	µS/cm	145	175
Sólidos suspendidos	mg/L	108	mg/L	231	498
Cloruros	mg/L	6102	mg/L	3,69	5,93
Sulfatos	mg/L	2015,9	mg/L	10,2	16,7

Se aprecia que hay una menor cantidad de sólidos suspendidos en el río Loa que en el Paraná, sin embargo, la cantidad de sales disueltas en el río Loa son mucho mayores que en el río Paraná, dado que el primero pasa por una zona desértica, cerca de varios salares, lo cual explica el alto valor de su conductividad eléctrica. Esto implica que se debe poner especial relevancia a la etapa de desionización del agua.

Por lo tanto, se hará hincapié en el diseño del tren de purificación (ver ítem 8-2). Por esa razón, para los cálculos de las resinas de intercambio iónico usaremos los equivalentes calculados a partir de la concentración de los aniones negativos más importantes: cloruros y sulfatos. Siguiendo el procedimiento descrito en el [anexo 1](#) los resultados se presentan en la tabla a continuación:

Parámetros	Unidad	Valor normal	Unidad	Equivalentes
Cloruros	mg/L	6102,00	eq/L	0,17
Sulfatos	mg/L	2015,90	eq/L	0,04
Total			eq/L	0,21

Por electroneutralidad consideramos que para los cationes, tenemos el mismo número de equivalentes por litro. Esto debido a que no se dispone de la concentración explícita para los cationes totales y no los podemos calcular directamente.

Similarmente realizamos el mismo cálculo para los nitritos, como base de cálculo para las resinas débiles:

Parámetros	Unidad	Valor normal	Unidad	Equivalentes
Nitritos	mg/L	12,00	eq/L	$2,61 \cdot 10^{-4}$
Total			eq/L	$2,61 \cdot 10^{-4}$

6 Estimación de consumo de agua de la central nuclear

Para poder dimensionar la planta de agua es necesario estimar los volúmenes de agua que se necesitan en el reactor. Para esto se deben considerar los distintos sistemas en los que se requiere el agua desmineralizada en la central nuclear.

La planta debe suministrar agua para los circuitos primario, secundario y auxiliares, tanto durante la operación normal de la planta, como para los procesos de puesta en funcionamiento de la central por primera vez [{NRC01}](#). Solamente se usarán algunos sistemas para los cálculos, los cuales fueron seleccionados por ser los más representativos en cuanto a volumen para cada sección del reactor.

El sistema de tratamiento de agua desmineralizada debe proveer agua suficiente para los sistemas húmedos principales del reactor. Estos sistemas se expresan en la siguiente figura.

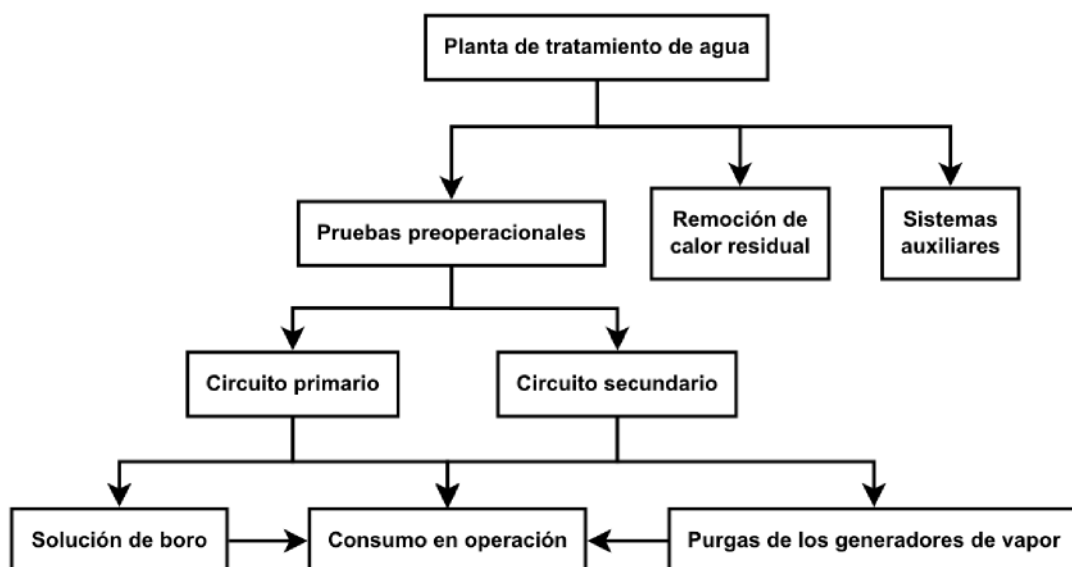


Figura 4: Sistemas alimentados por la planta de agua

Estos sistemas se dividen en los que implican un inventario fijo de agua desmineralizada y los que requieren una alimentación de reposición. En el primer caso se cuentan los circuitos primario, secundario y auxiliares; mientras que en la segunda categoría se cuenta con los consumos operacionales y la mantención del sistema de remoción de calor residual. Sólo se están utilizando a efectos de cálculo algunos sistemas considerados representativos de los circuitos principales, de los cuales se tenía información en el momento de escribir este documento. Esto es considerando sólo un primer cálculo. Todos estos valores fueron obtenidos

de la bibliografía {NRC01}. Los cálculos detallados se encuentran en el [anexo 2](#) de este documento.

6-1 Circuito primario

Para el cálculo de este sistema se cuenta con las dimensiones del recipiente de presión del reactor, el cual nos da un volumen de $136,73 \text{ m}^3$.

El presurizador cuenta con $59,47 \text{ m}^3$.

También se debe considerar el volumen contenido en los generadores de vapor por el lado del primario, que incluyen un volumen de $58,81 \text{ m}^3$ por cada generador de vapor.

6-2 Circuito secundario

Este sistema cuenta principalmente con los generadores de vapor como componentes principales para calcular el volumen a emplear. En el lado secundario de los generadores de vapor el volumen de agua en estado líquido es de $103,24 \text{ m}^3$ en total.

6-3 Sistemas auxiliares

Básicamente consisten en las piscinas de almacenamiento de elementos combustibles usados y sus sistemas asociados.

La piscina de almacenamiento de elementos combustibles usados consta de $685,16 \text{ m}^3$.

El canal de transferencia de elementos combustibles requiere $242,64 \text{ m}^3$.

6-4 Solución de boro

El estanque cuenta con $0,57 \text{ m}^3$ para la preparación de la solución.

6-5 Pruebas preoperacionales

Para las pruebas preoperacionales se necesita llenar los circuitos primario y secundario tanto para realizar un lavado inicial de dichos circuitos como para realizar el pasivado de sus estructuras internas. Esto significa que los volúmenes calculados anteriormente deben ser multiplicados por 3 (lavado, pasivado y llenado).

6-6 Purgas de los generadores de vapor

Se considera que la purga corresponde a un 1% del caudal de alimentación. Esto significa que se tienen $68,1 \text{ m}^3/\text{h}$ que deben ser repuestos.

6-7 Remoción de calor residual

Para el cálculo de reposición de agua de este sistema se considera un 0,1% del caudal total que circula por este sistema. De este modo se requiere suficiente agua para poder compensar $0,34 \text{ m}^3/\text{hr}$.

6-8 Consumo en operación

Se debe garantizar la alimentación de agua durante las etapas de arranque en caliente. Esto consiste en 118,1 m³/h.

Además se considera que se debe reponer la totalidad del agua del primario al cabo de 1 año. Este valor equivale a 0,15 m³/h durante todo un año de operación.

Considerando todos estos cálculos conocemos la capacidad que debe tener la planta de agua. Para asegurar un funcionamiento adecuado de la planta consideraremos un margen de seguridad de un 20% (tomado como criterio de ingeniería), de modo que el requisito total de agua para esta planta de agua, y por ende, el valor objetivo para los cálculos será producir 4631,83 m³ de agua en total para llenar los sistemas del reactor durante la primera operación, con una tasa de producción de 141,72m³/h.

La siguiente tabla muestra un resumen de los volúmenes y caudales calculados para los sistemas del reactor:

<i>Sistemas y subsistemas</i>		<i>Volumen [m³]</i>	<i>Caudal [m³/h]</i>
Circuito primario	Recipiente del reactor	136,73	
	Presurizador	59,47	
	Primario del generador de vapor	58,81	
Circuito secundario	Secundario del generador de vapor	103,24	
Sistemas auxiliares	Piscina de elementos combustibles usados	685,16	
	Canal de transferencia	242,64	
Tanque de solución de boro		0,57	
Purgas de los generadores de vapor			68,10
Sistema de remoción de calor residual			0,34
Consumo en operación	Arranque en caliente		118,10
	Consumo normal anual		0,15
Subtotal / Máximo		1286,62	118,10
Final (incluye 20% de margen de seguridad)		1543,94	141,72

7 Diseño del proceso de tratamiento de agua

El sistema de tratamiento de agua se basará principalmente en la desionización por medio de resinas de intercambio iónico, aplicando algunas particularidades propias para el agua del río Loa.

El diagrama de flujo del proceso simplificado inicial se describe en la siguiente figura:

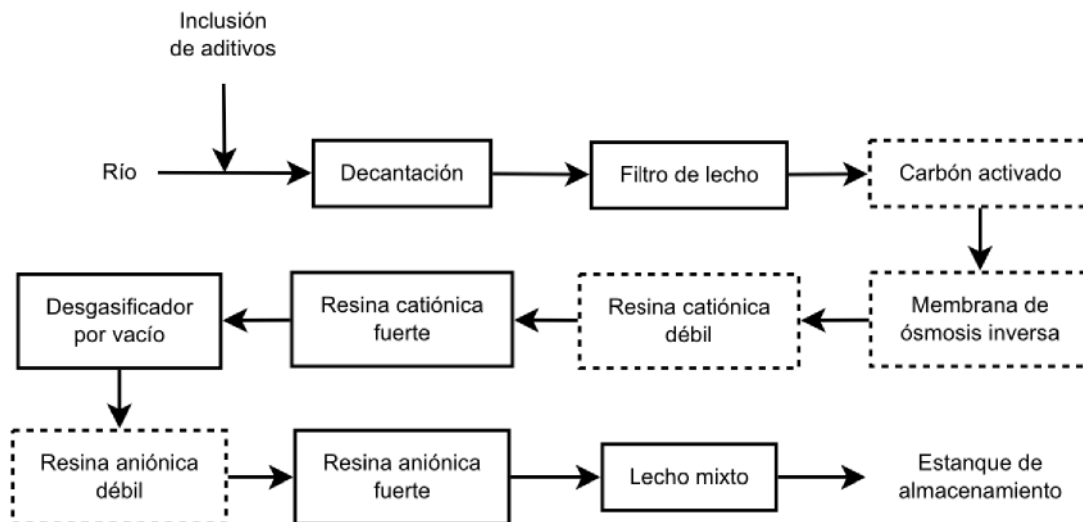


Figura 5: Diagrama de flujo simplificado inicial para el río Loa

En la figura anterior se muestran las etapas del tratamiento de agua. El proceso es muy parecido al que se utiliza en el río Paraná, pero tiene algunas diferencias. Las etapas que aparecen con líneas punteadas no se utilizan en las plantas de procesamiento del río Paraná, sin embargo, dadas las propiedades del agua del río Loa serán implementadas en este diseño particular. Esto es principalmente debido al hecho que la salinidad del río Loa es dos órdenes de magnitud superior al del río Paraná, lo cual implica poner especial énfasis en la remoción de iones. Para aumentar el tiempo entre regeneraciones de las resinas se incorpora una membrana de ósmosis inversa para reducir la carga iónica del agua. Asimismo, se incorporan resinas débiles para mejorar la eficiencia del uso de los regenerantes [{FNK01}](#).

7-1 Inclusión de aditivos

La primera fase del tratamiento consiste en la remoción de las partículas sólidas suspendidas en el agua, de tal forma que no interfieran en los procesos posteriores del tratamiento del agua. Para esto, se agregarán y mezclarán aditivos al agua del río, que incluyen coagulantes y floculantes. Un ejemplo comercial de estos aditivos es RoQuest 4000 [{AVI02}](#) ([anexo 7](#)).

7-1-1 Coagulación

Las partículas suspendidas en el agua forman coágulos en los que quedan atrapadas para que finalmente puedan ser removidas del líquido.

En esta etapa se mezclan las sustancias coagulantes con el agua y se produce la coagulación, durante la cual los aditivos descritos desestabilizan las cargas negativas de las partículas suspendidas, de forma tal que puedan atraerse mutuamente y aglomerarse [{CM01}{FNK01}](#).

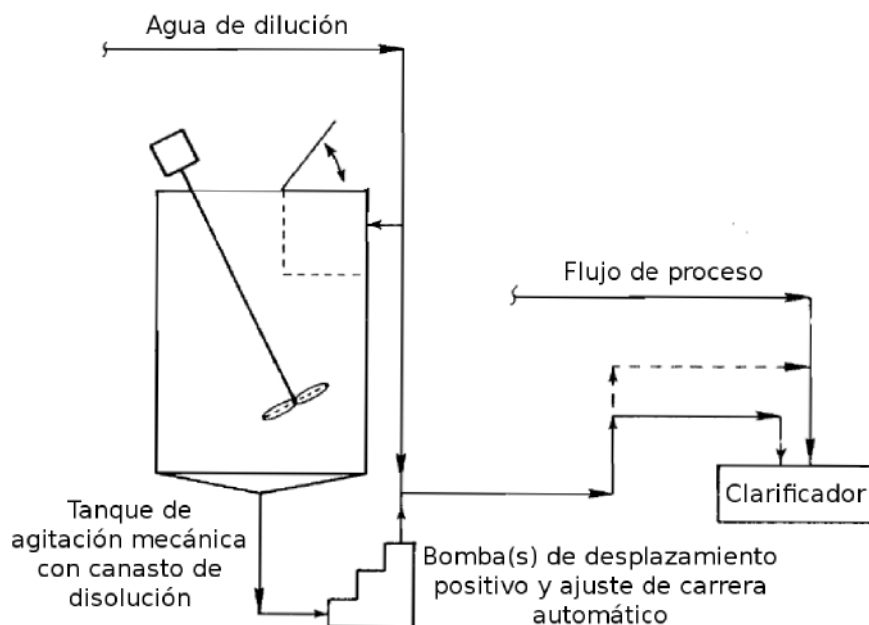


Figura 6: Sistema de alimentación de coagulante típico [{PC01}](#) (pág. 1146)

7-1-2 Floculación

En esta etapa se produce la floculación, donde los coágulos formados en la etapa anterior se unen formando flóculos de mayor peso que pueden decantar más rápidamente, gracias al efecto de los polímeros presentes en los aditivos agregados anteriormente [{CM01}{FNK01}](#).

7-2 Decantación

El agua llega a un estanque de decantación, en donde tendrá un tiempo de residencia que permita que por gravedad las partículas floculadas precipiten hasta el fondo del estanque. Desde la parte superior se colectará el agua clarificada, la cual pasará a la siguiente etapa del proceso [{CM01}{FNK01}](#). El equipo presentado en la figura 7 es sólo a modo de ejemplo, pero para un diseño aplicado se debe buscar en el mercado un equipo actualizado que emplee las tecnologías disponibles actualmente.

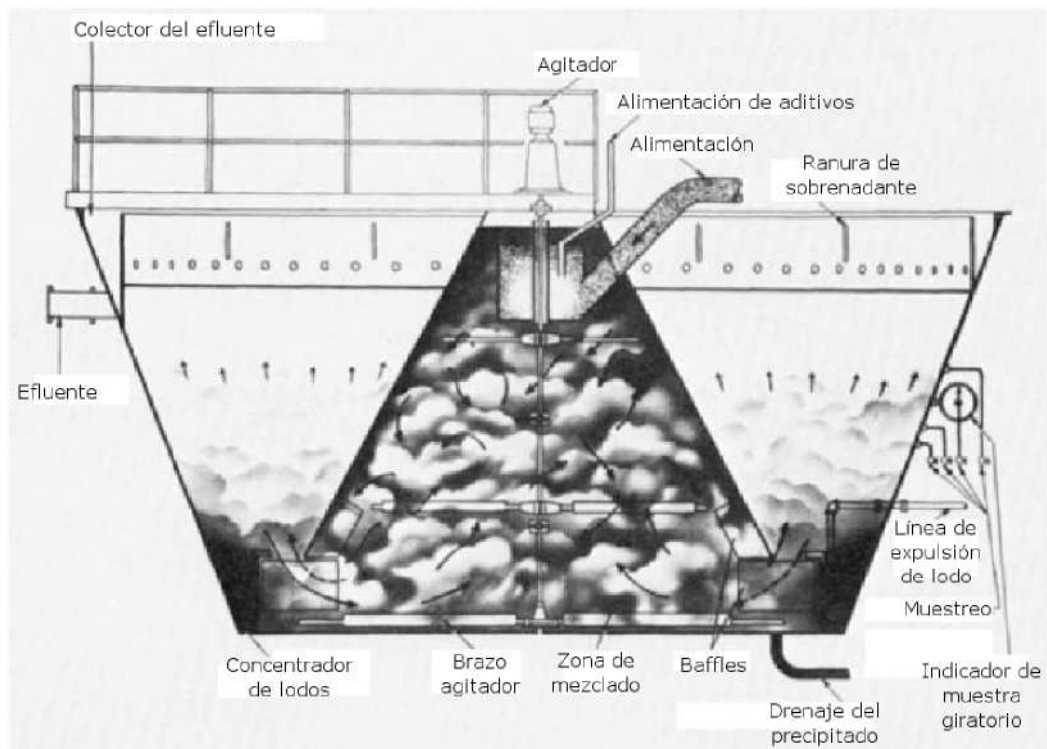


Figura 7: Reactor-clarificador de contacto de sólidos (Cortesía de Permutit Co., Inc.) [{PC01}](#) (pag. 1148)

7-3 Filtro de lecho

Consiste en un filtro de arena operado por gravedad. El objetivo de esta etapa es retener cualquier partícula que no haya alcanzado a precipitar o contener los flóculos que no hayan alcanzado el peso suficiente para decantar en la etapa anterior. Al final de este paso, se tendrá agua sin partículas suspendidas, lista para iniciar las etapas de ósmosis inversa y luego desmineralización [{CM01}](#)[{FNK01}](#).

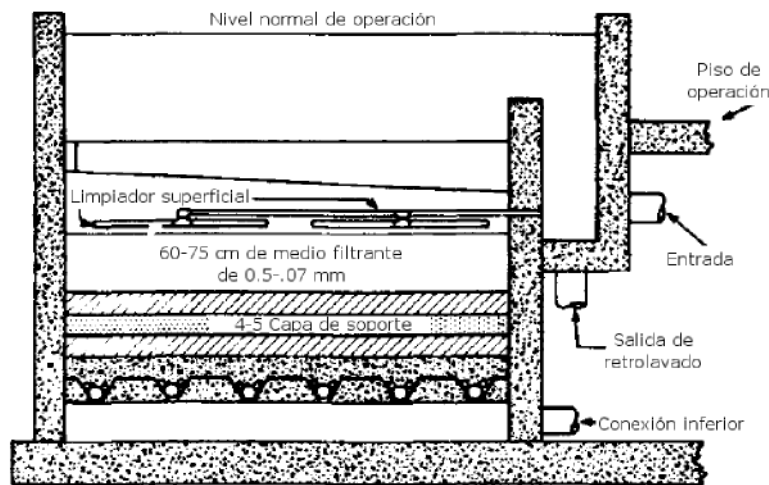


Figura 8: Filtro de gravedad {FNK01} (Pag. 9.21)

7-4 Carbón activado

Esta etapa es muy parecida al filtro de lecho, salvo que se reemplaza la arena por carbón activado, lo que permite remover algunas moléculas orgánicas y el cloro disuelto que pueda contener el agua por algún tratamiento de desinfección previo, lo cual será de gran importancia para la etapa siguiente, extendiendo la vida útil de la membrana de ósmosis inversa. Esta etapa está presente sólo para el caso del río Loa {CM01}{FNK01}.

7-5 Membrana de ósmosis inversa

La membrana de ósmosis inversa tiene como función reducir el nivel total de sólidos disueltos en el agua a un nivel más apropiado para trabajar con las resinas de intercambio iónico, de forma de asegurar un ciclo de operación más largo para esos equipos. Se utilizarán los datos de la membrana comercial, modelo M-S4040A de Applied Membranes Inc. {AMI01} (anexo 4). La membrana permite el paso del agua, pero no de los sólidos disueltos, usando una fuente de alta presión {CM01}{FNK01}. Esta etapa también está presente sólo para el caso del río Loa. La alternativa a esta membrana era un sistema de electrodiálisis. Este sistema es similar al de membranas de ósmosis inversa, salvo que no utiliza altas presiones y se caracteriza por tener canales separados para los flujos purificado y concentrado. Sin embargo, ese sistema se descartó, porque las altas concentraciones de sales del agua podrían favorecer la precipitación e incrustación de sales en el lado interno de las membranas de los canales de salmuera, reduciendo la eficiencia del equipo y su vida útil {CM01}{FNK01}.

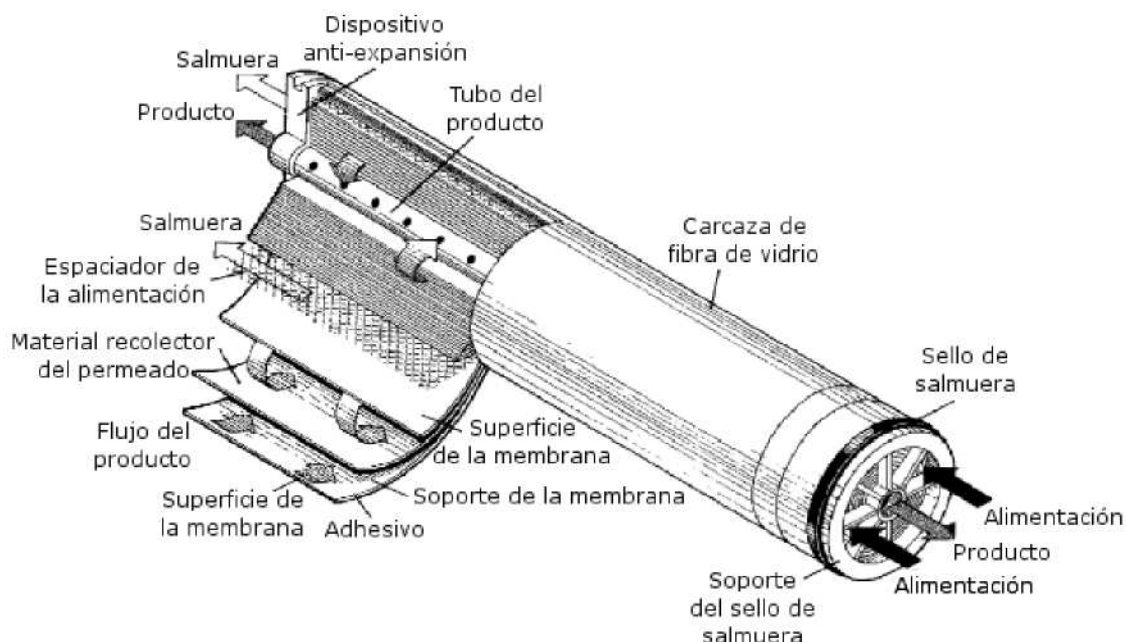
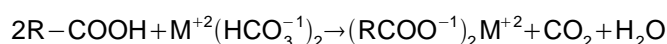


Figura 9: Unidad de ósmosis inversa en espiral (cortesía de E. I. Du Pont de Nemours & Co., Inc.) [{PC01}](#) (pag. 1163)

7-6 Resina catiónica débil

Esta etapa es necesaria para el caso del río Loa, solamente. Con esta resina se logra remover algunos metales pesados del agua y reducir la dureza antes que llegue a la siguiente etapa mejorando así la eficiencia de la remoción de cationes del agua [{FNK01}](#). La resina se encarga de reemplazar los cationes disueltos en el agua por iones hidronio (H^+), entregando un agua con pH menor. Para el dimensionamiento de esta resina se utiliza el valor de los iones nitritos en el agua [{PC01}](#). En la siguiente reacción se considera M un catión metálico (Ca^{+2} , Mg^{+2}).



7-7 Resina catiónica fuerte

Esta resina se encarga de remover los cationes que pasaron la resina débil. Puesto que se trata de una resina de carácter fuerte, su acción es más intensa, permitiendo una remoción casi total de cationes del agua [{CM01}{FNK01}](#). Combinada con una resina catiónica débil, como en la etapa anterior, permite mejorar la eficiencia en el uso del ácido regenerante. Para el dimensionamiento de esta resina se utiliza la concentración de iones cloruro y sulfato en el agua [{PC01}](#). En la siguiente reacción se considera M un catión metálico (Na^+) y A un anión no metálico (Cl^- , SO_4^{-2}).

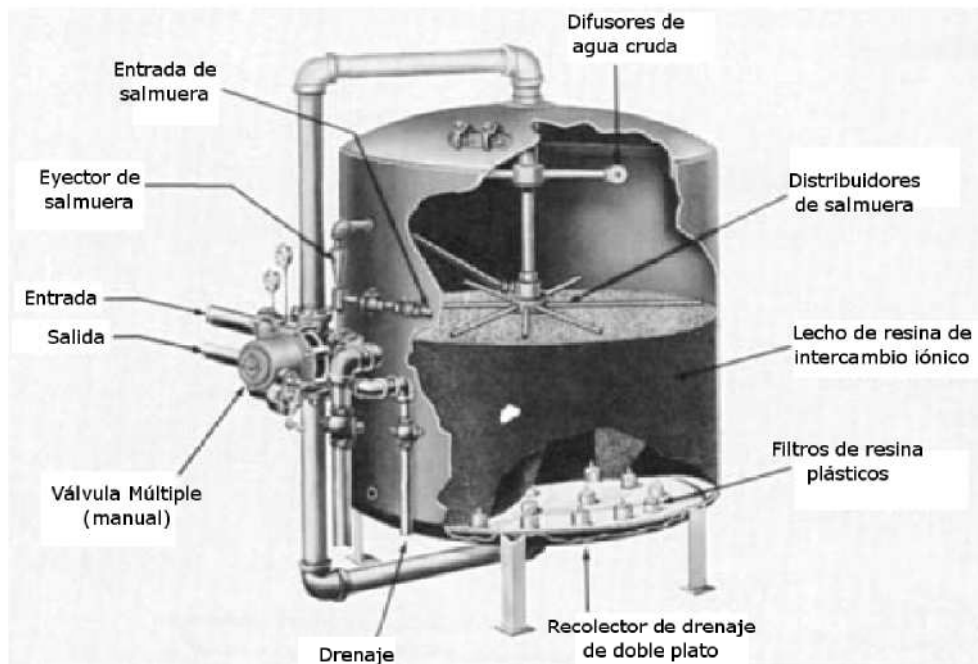
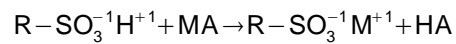


Figura 10: Unidad de intercambio iónico con regeneración co-corriente (Cortesía de Permutit Company) [{FNK01}](#) (pag. 12,12)

7-8 Desgasificador por vacío

Esta etapa permite remover los gases disueltos en el agua, fundamentalmente el oxígeno y el dióxido de carbono. El primero, para disminuir las propiedades oxidantes del agua, protegiendo las estructuras internas de los sistemas, y el segundo para evitar que interfiera en las etapas posteriores del tratamiento de agua. Para llevar a cabo este proceso se utiliza una columna empaquetada que permite maximizar la superficie de contacto entre el líquido y el "aire". Para este proceso, en lugar de inyectar aire dentro de la columna, se usa una bomba para reducir la presión de tal forma de forzar la migración de las especies gaseosas disueltas en el agua hacia la fase gaseosa [{CM01}](#)[{FNK01}](#).

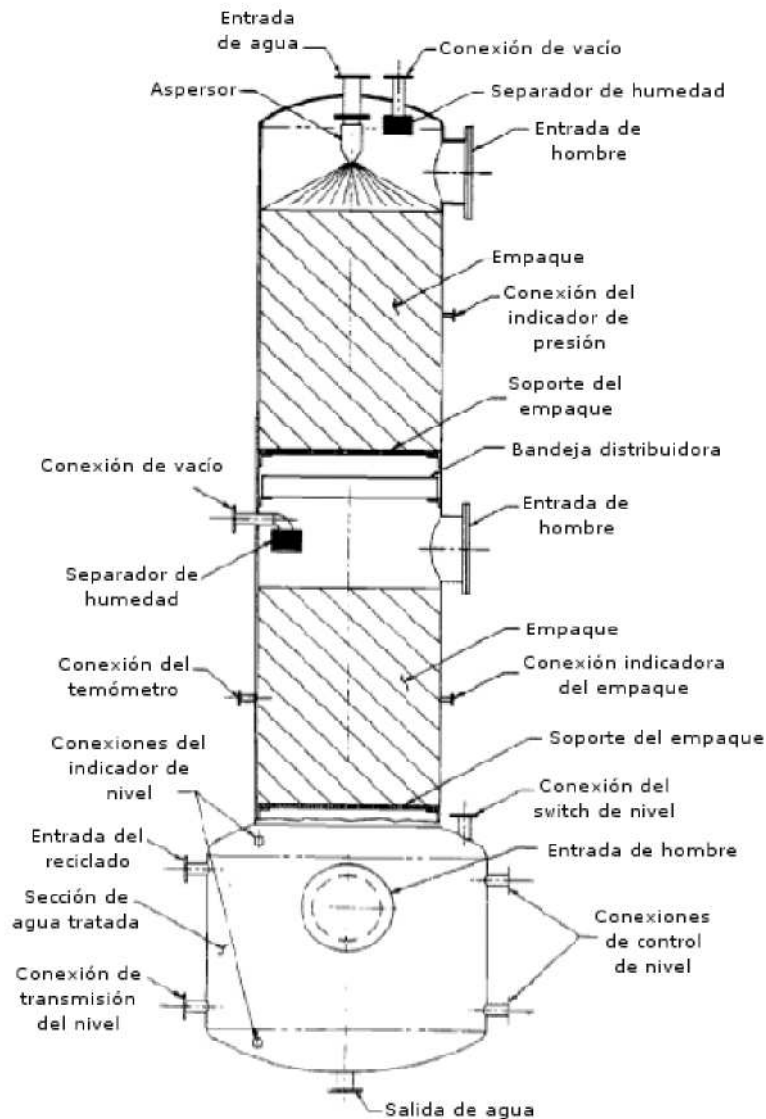
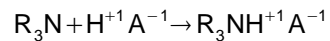


Figura 11: Esquema de un desgasificador de vacío (costesía de Belco Pollution Control Corp.) [{PC01}](#) (pag. 1169)

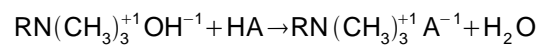
7-9 Resina aniónica débil

Con esta resina se remueve parte de los aniones que llegan de las etapas anteriores, de forma de reducir la carga en la resina fuerte. La resina se encarga de reemplazar los aniones disueltos en el agua por iones hidroxilo (OH^-), el cual neutraliza al ión hidronio que viene de las resinas catiónicas, formando agua pura [{FNK01}](#). Esta etapa es necesaria para el caso del río Loa. Para el dimensionamiento de esta resina se utiliza el valor de los iones nitritos en el agua [{PC01}](#). En la siguiente reacción se considera A un anión no metálico (Cl^- , SO_4^{2-}).



7-10 Resina aniónica fuerte

Del mismo modo que la resina catiónica fuerte, esta resina se encarga de remover los aniones que escaparon de la etapa anterior, completando la desionización del agua [{CM01}{FNK01}](#). Esta resina combinada con otra aniónica débil, como en la etapa anterior permite mejorar la eficiencia en el uso de los regenerantes. Para el dimensionamiento de esta resina se utiliza la concentración de iones cloruro y sulfato en el agua [{PC01}](#). En la siguiente reacción se considera A un anión no metálico (Cl⁻, SO₄⁻²).



7-11 Lecho mixto

Esta etapa final se utiliza para “pulir” la calidad del agua producida durante todas las etapas anteriores, de modo de asegurar que la calidad del agua entregada esté dentro de los requisitos operacionales. Consta de una mezcla de resinas aniónicas y catiónicas en un solo lecho. Esto permite que cualquier ión que haya escapado de las etapas anteriores sea neutralizado y reemplazado por su ión equivalente hidronio o hidroxilo, lográndose la calidad de agua requerida en el sistema [{CM01}{FNK01}](#).

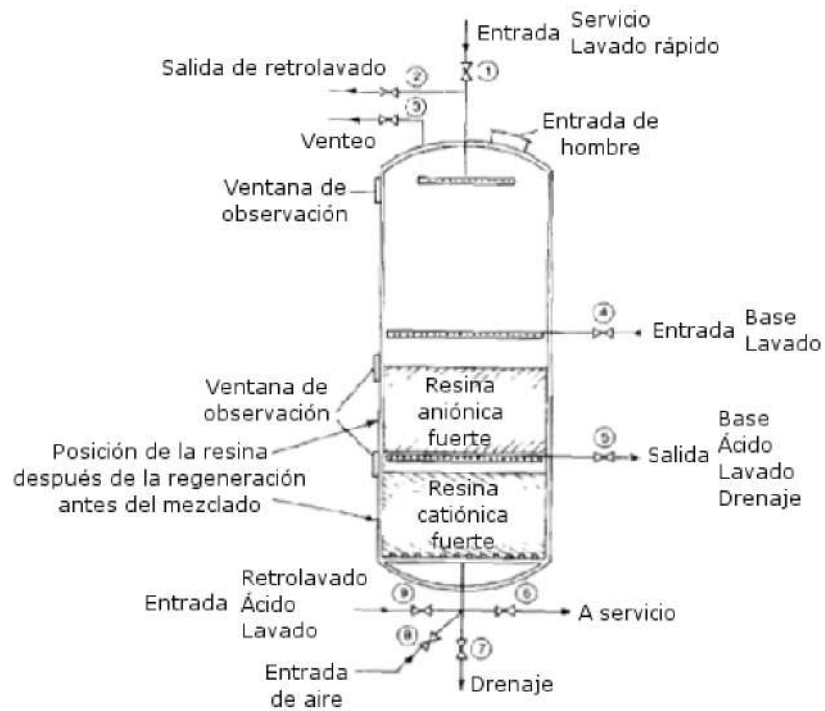


Figura 12: Intercambiador de lecho mixto típico {PC01} (pag. 1177)

Como se verá más adelante (ítemes [8-2-1](#) y [8-2-3](#)), los cálculos indican que no son necesarias las resinas de tipo débil, por la baja concentración de nitritos. Además, la inclusión de la membrana de ósmosis inversa reduce los niveles de iones dejándolos a un nivel mucho más cercano a lo que se tiene en el río Paraná, de modo que el proceso se simplifica notablemente. En el nuevo diseño se mantienen las mismas etapas que contenía el proceso inicialmente, retirándose solamente las resinas débiles que probaron no ser necesarias. De este modo el diagrama de flujo se simplificará, quedando como se expresa en la siguiente figura:

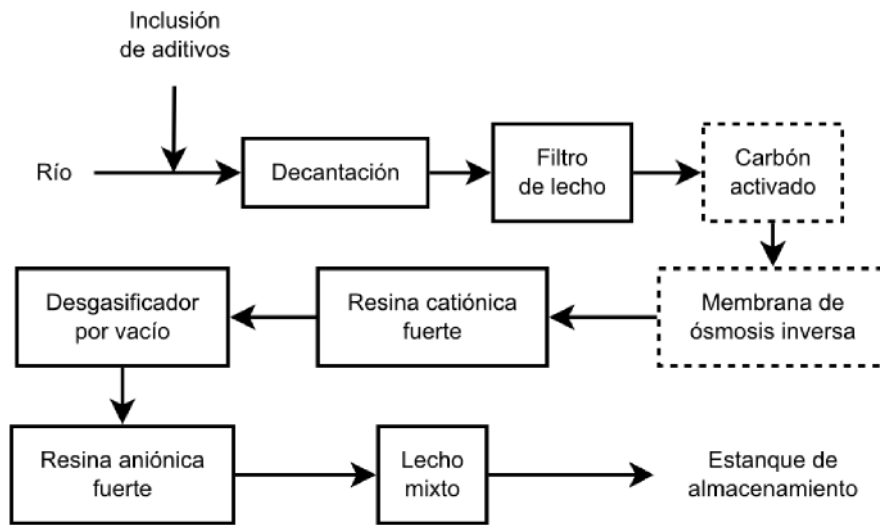


Figura 13: Diagrama de flujo simplificado final para el río Loa

8 Diseño de equipos principales del tratamiento de agua

En esta sección, se describe el diseño del equipo de ósmosis inversa y el prediseño del tren de purificación del agua, para saber los volúmenes necesario en los lechos de resina. Sólo se realizará el diseño conceptual de los equipos de proceso considerados más importantes para el proceso.

8-1 Equipo de ósmosis inversa

Para dimensionar el equipo de membranas de ósmosis inversa, basta utilizar los datos entregados por el proveedor [{AMI01}](#) (anexo 4) y según eso determinar cuántas unidades se requieren. De acuerdo a esa información, cada unidad puede entregar 7.38 m³/día de agua tratada, que corresponden a 0.31 m³/h. Dividiendo el flujo de operación de 150 m³/h (algo superior al calculado anteriormente) por lo que cada unidad puede tratar, tenemos que se requieren 484 de estas unidades para entregar el agua necesaria para la operación. Si a esto le agregamos un 20% de margen de seguridad, terminamos necesitando 581 unidades en total. Debido a que este valor es demasiado alto será necesario realizar búsqueda de otros proveedores de membranas que tengan prestaciones más apropiadas para esta aplicación, de forma de requerir un menor número de unidades para esta etapa.

Considerando que un 75% del agua ingresada al equipo de ósmosis inversa se obtiene como producto [{CM01}{FNK01}](#) y este flujo debe ser de 150 m³/h, debemos alimentar a este equipo el equivalente de 200 m³/h.

8-2 Resinas de intercambio iónico

A partir de la concentración de iones del agua del río Loa, realizaremos los cálculos de dimensionamiento de las columnas de intercambio iónico. Debemos considerar que las concentraciones descritas son a la entrada del proceso de tratamiento de agua, pero antes de llegar a las resinas de intercambio iónico el agua pasa por una membrana de ósmosis inversa con un rechazo de alrededor del 99,4% [{AMI01}](#) (anexo 4) de las sales disueltas. De este modo debemos recalcular las concentraciones de entrada a las resinas de intercambio iónico, lo que se aprecia en la siguiente tabla (valores expresados en eq/L):

Especies	Antes de MOI	Después de MOI
Iones fuertes	0,21	0,0012
Iones débiles	$2,61 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-6}$

Consideraremos un tiempo entre regeneraciones de 32 horas, de modo de poder producir el agua necesaria para la primera puesta en marcha de la central sin necesidad de regenerar las

resinas en el intertanto. De este modo, nuestro volumen de agua a tratar entre regeneraciones es de 4800 m³.

Las capacidades (expresadas en eq/L) de las resinas de intercambio iónico utilizadas para los cálculos están descritas en la tabla a continuación. Las resinas son de la línea Amberlite de Rohm & Haas [{RHA01}](#) ([anexo 5](#)):

Resina	Valor
Catiónica débil: IRC86RF	4,10
Catiónica fuerte: IR120 H	1,80
Aniónica débil: IRA92	1,60
Aniónica fuerte: IRA402 CL	1,20

Asimismo emplearemos un flujo permitido de 90 m³/(h·m²) de acuerdo a la recomendación descrita en la bibliografía [{PC01}](#).

También consideramos que las resinas tienen un factor de expansión de un 50% del volumen no expandido. Y no utilizaremos lecho de soporte. Siguiendo el procedimiento de cálculo descrito en el [anexo 3](#) tenemos que los resultados para los valores expresados más arriba son como figuran a continuación.

8-2-1 Columna catiónica débil

$$V_{\text{res-CD}} = \frac{1,57 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{eq}}{\text{L}} \right] \cdot 4800 [\text{m}^3]}{4,1 \left[\frac{\text{eq}}{\text{L}} \right]} = 1,84 \cdot 10^{-3} [\text{m}^3]$$

Este volumen tan bajo indica que no será necesaria esta resina en el sistema de tratamiento de agua.

8-2-2 Columna catiónica fuerte

$$V_{\text{res-CF}} = \frac{0,0012 \left[\frac{\text{eq}}{\text{L}} \right] \cdot 4800 [\text{m}^3]}{1,8 \left[\frac{\text{eq}}{\text{L}} \right]} = 3,2 [\text{m}^3] \quad A_{\text{CF}} = \frac{150 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]}{90 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2} \right]} = 1,67 [\text{m}^2]$$

$$D_{\text{CF}} = \sqrt{\frac{1,67 [\text{m}^2]}{0,785}} = 1,46 [\text{m}] \quad h_{\text{CF}} = \frac{3,2 [\text{m}^3]}{1,67 [\text{m}^2]} = 1,92 [\text{m}]$$

$$H_{\text{CF}} = 1,92 [\text{m}] + 0 + 1,92 [\text{m}] \cdot 0,5 = 2,88 [\text{m}]$$

Finalmente la altura del tanque definitiva será de 3,5 m, incluyendo el factor de seguridad.

8-2-3 Columna aniónica débil

$$V_{\text{res-AD}} = \frac{1,57 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{eq}}{\text{L}} \right] \cdot 4800 [\text{m}^3]}{1,6 \left[\frac{\text{eq}}{\text{L}} \right]} = 4,71 \cdot 10^{-3} [\text{m}^3]$$

Este volumen tan bajo indica que no será necesaria esta resina en el sistema de tratamiento de agua.

8-2-4 Columna aniónica fuerte

$$V_{\text{res-AF}} = \frac{0,0012 \left[\frac{\text{eq}}{\text{L}} \right] \cdot 4800 [\text{m}^3]}{1,2 \left[\frac{\text{eq}}{\text{L}} \right]} = 4,8 [\text{m}^3] \quad A_{\text{AF}} = \frac{150 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]}{90 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2} \right]} = 1,67 [\text{m}^2]$$

$$D_{\text{AF}} = \sqrt{\frac{1,67 [\text{m}^2]}{0,785}} = 1,46 [\text{m}] \quad h_{\text{AF}} = \frac{4,8 [\text{m}^3]}{1,67 [\text{m}^2]} = 2,87 [\text{m}]$$

$$H_{\text{AF}} = 2,87 [\text{m}] + 0 + 2,87 [\text{m}] \cdot 0,5 = 4,31 [\text{m}]$$

Finalmente la altura del tanque definitiva será de 5,2 m, incluyendo el factor de seguridad.

8-2-5 Lecho mixto

Para el cálculo de la resina de lecho mixto se empleará un volumen de resina similar a las resinas fuertes anteriores, pero será distribuida de acuerdo a la relación de sus capacidades.

Por esto consideraremos un volumen de lecho mixto de 5 m³ al aproximar el volumen del lecho de resina aniónica fuerte, que resultó ser el más grande. De este modo, tendremos que las dimensiones del tanque de lecho mixto son:

$$A_{\text{AF}} = \frac{150 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]}{90 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2} \right]} = 1,67 [\text{m}^2] \quad D_{\text{AF}} = \sqrt{\frac{1,67 [\text{m}^2]}{0,785}} = 1,46 [\text{m}] \quad h_{\text{AF}} = \frac{5 [\text{m}^3]}{1,67 [\text{m}^2]} = 2,99 [\text{m}]$$

$$H_{\text{AF}} = 2,99 [\text{m}] + 0 + 2,99 [\text{m}] \cdot 0,5 = 4,49 [\text{m}]$$

Incluyendo el factor de seguridad, tenemos una altura de de 5,4 m para el tanque del lecho mixto.

9 Conclusiones

En este trabajo se realizó el diseño conceptual de la planta de tratamiento de agua necesaria para una central del tipo AP1000. En la misma se recopilaron parámetros químicos de la calidad del río, se estimó el consumo de agua desmineralizada, tanto para el llenado de los equipos y sistemas, como la reposición a los mismos, y finalmente, se realizó el cálculo de los equipos de ósmosis inversa y de las resinas de intercambio iónico.

Como se pudo observar en el presente documento, contar con información actualizada y apropiada de la calidad del agua es fundamental para el diseño de una planta purificadora. En base a esta información se pueden definir las etapas que tendrá el proceso de tratamiento de agua, y de acuerdo a esto se pueden seleccionar los equipos más apropiados para cumplir con los requisitos. La información recopilada en este trabajo estaba más orientada a usos agrícolas, lo cual afectó la disponibilidad de la información relevante para esta tesis, como la ausencia de las concentraciones de iones Ca^{+2} y Ba^{+2} , relevantes para las membranas de ósmosis inversa y su vida útil.

Es importante contar con la experiencia en el diseño del proceso y en el uso de los distintos equipos, ya que por falta de la misma se puede incurrir en errores que posteriormente lleven a tener que redefinir el proceso, como se pudo observar durante este trabajo, en el cual, a través de los cálculos, se redefinió el diseño del proceso. Es útil también para reconocer proveedores apropiados para los equipos de proceso, como membranas de ósmosis inversa que entreguen mayores caudales de producto, con una presión de trabajo menor.

También es importante considerar, en un diseño ya no conceptual sino de aplicación práctica, el costo de instalación, mantención y operación de cada equipo para lograr optimizar el proceso tanto desde el punto de vista funcional como económico, como es el caso de los equipos de ósmosis inversa. Se debe evaluar la posibilidad de usar membranas de ósmosis inversa usando un diseño en dos pasos, alimentando el segundo con el producto del primero y recirculando el rechazo del segundo paso como alimentación para el primero. La búsqueda de membranas mejor diseñadas para esta aplicación (no para tratamiento de agua de mar), con presiones optimizadas para reducir el consumo de energía, es fundamental para un buen análisis de costos. Tal vez desde el punto de vista económico y operacional, sea más conveniente la utilización de lechos de intercambio iónico adicionales, en vez de tantos equipos de ósmosis inversa.

En el [Anexo 6](#) se presenta una alternativa para el diseño del tratamiento del agua, considerando como fuente, agua de mar.

Finalmente, quiero agradecer el apoyo de mi director y mi co-directora en esta tesina, ya que con su ayuda y experiencia me ayudaron a completar este trabajo.

Referencias bibliográficas

- TLS01: E. E. Cummins, M. M. Corletti, T. L. Shulz, Westinghouse AP1000 advanced passive plant, 2006, Nuclear Engineering and Design, 236, 1547-1557
- TM01: T. Meneely, AP1000 design overview, 2009, Westinghouse Electric Company LLC
- APW01: Westinghouse, Technology Fact Sheet: Westinghouse AP1000, , , ,
- NRC01: Westinghouse, AP1000 design control document, , NRC, , Design certification rule for the AP1000 design
- VGB01: H. Neder, M. Jürgensen, D. Wolter, U. Staudt, S. Odar, V. Schneider, VGB primary and secondary side water chemistry guidelines for PWR plants, 2006, AREVA NP GmbH, ,
- DGA01: Dirección General de Aguas, Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: cuenca río Loa, 2004, , Gobierno de Chile,
- RAS01: K. Baccaro, M. Degorgue, M. Lucca, L. Picone, E. Zamuner, Y. Andreoli, Calidad del agua para consumo humano y riego en muestras del cinturón hortícola de Mar del Plata, 2006, INTA, Argentina, ,
- FNK01: F. N. Kemmer, The NALCO water handbook, 1988, McGraw-Hill Book Company, segunda edición
- AVI02: Avista Technologies, RoQuest 4000, RoQuest, http://www.avistatech.com/Coagulants/RoQuest_4000_Data.htm#pab1_4
- CM01: C. Morelli, Basic principles of water treatment, 1996, Tall Oaks Publishing Inc., Primera edición
- PC01: P. Cohen, The ASME handbook of water technology for thermal power systems, 1989, American Society of Mechanical Engineers,
- AMI01: Applied Membranes Inc., 4" seawater FRP wrapped thin film elements, Modelo M-S4040A, http://www.appliedmembranes.com/seawater_membranes.htm
- RHA01: Rohm & Haas, Ion exchange resins for industrial water treatments, Amberlite, http://www.rohmmaas.com/wcm/products/product_listner.page?&industry=1000443&application=1120762
- RHP01: R. H. Perry, D. W. Green, Perry's Chemical Engineers' Handbook, 1999, McGraw-Hill Companies, Inc., séptima edición
- SFW01: J. F. Anthoni, The chemical composition of seawater, , <http://www.seafriends.org.nz/oceano/seawater.htm>
- HIC01: Hanna Instruments, El agua de mar, , <http://www.hannachile.com/noticias-articulos-y-consejos/articulos/246-el-agua-de-mar>
- AVI01: Avista Technologies, RoCide IS2 Non-oxidizing biocide, RoCide, http://www.avistatech.com/Biocides/RoCide_IS2_Data.htm#pab1_2

Anexos

Anexo 1: Cálculo de equivalentes

Para el cálculo de los equivalentes iónicos en el agua del río Loa se utilizaron los siguientes datos, teniendo en cuenta que sólo se consideraron en el cálculo las concentraciones de los aniones cloruro y sulfato para las resinas fuertes y del nitrito para las resinas débiles:

Masa atómica del cloro: 35,5 g/mol

Masa atómica del azufre: 32,1 g/mol

Masa atómica del oxígeno: 16 g/mol

Masa atómica del nitrógeno: 14 g/mol

Masa atómica del sulfato (SO_4^{2-}): 96,1 g/mol

Masa atómica del nitrito (NO_2^-): 46 g/mol

Número de equivalentes por mol de cloruro: 1 eq/mol

Número de equivalentes por mol de sulfato: 2 eq/mol

Para el cálculo se multiplicó la concentración de iones en el agua por el número de equivalentes por mol y se dividió por la masa atómica. Esto se expresa como:

$$\text{Cloruro: } \frac{6,102 \left[\frac{\text{g}}{\text{L}} \right] \cdot 1 \left[\frac{\text{eq}}{\text{mol}} \right]}{35,5 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]} = 0,17 \left[\frac{\text{eq}}{\text{L}} \right]$$

$$\text{Sulfato: } \frac{2,0159 \left[\frac{\text{g}}{\text{L}} \right] \cdot 2 \left[\frac{\text{eq}}{\text{mol}} \right]}{96,1 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]} = 0,04 \left[\frac{\text{eq}}{\text{L}} \right]$$

De esta forma, el total de equivalentes por litro es de 0,21 para las resinas fuertes.

Para las resinas débiles tenemos:

$$\text{Nitrito: } \frac{0,012 \left[\frac{\text{g}}{\text{L}} \right] \cdot 1 \left[\frac{\text{eq}}{\text{mol}} \right]}{35,5 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]} = 2,61 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{eq}}{\text{L}} \right]$$

Anexo 2: Cálculo de los volúmenes y caudales de agua

A partir de los datos obtenidos de la descripción del reactor [{NRC01}](#) se realizó la conversión de unidades para obtener todos los valores en unidades del sistema internacional.

Circuito primario

Volumen interno del recipiente del reactor. Se sabe que el recipiente del reactor es un cilindro con tapas semiesféricas. Las dimensiones de cada parte son:

- Semiesfera superior: radio=77,5 in
- Semiesfera inferior: radio=79,09 in
- Cuerpo cilíndrico: diámetro interno=159 in y altura=318,5 in

Llevando todos estos datos a metros tenemos:

- Semiesfera superior: radio=1,97 m
- Semiesfera inferior: radio=2,01 m
- Cuerpo cilíndrico: diámetro interno=4,04 m y altura=8,09 m

Con estos datos calculamos el volumen de cada parte por separado y posteriormente los sumamos para obtener el volumen total del recipiente:

- Semiesfera superior: $Vol = \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 = 16,01 \text{ m}^3$

- Semiesfera inferior: $Vol = \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 = 17,01 \text{ m}^3$

- Cuerpo cilíndrico: $Vol = \pi \cdot r^2 \cdot h = 103,71 \text{ m}^3$

Por lo tanto el volumen total del recipiente del reactor es de $136,73 \text{ m}^3$.

El presurizador cuenta con un volumen de 2100 ft^3 que al pasarlos a sistema internacional quedan $59,47 \text{ m}^3$.

El volumen de agua del lado primario de los generadores de vapor está indicado en 2077 ft^3 , lo cual pasa a ser de $58,81 \text{ m}^3$.

El total del volumen del circuito primario es de: **$255,01 \text{ m}^3$** .

Circuito secundario

El lado secundario de los generadores de vapor tiene un volumen de agua de 3646 ft^3 que en sistema internacional corresponden a **$103,24 \text{ m}^3$** .

Este valor incluye a los dos generadores de vapor.

Sistemas auxiliares

La piscina de almacenamiento de combustibles usados tiene un volumen de 181000 gal que en sistema internacional equivalen a $685,16 \text{ m}^3$.

El canal de transferencia de elementos combustibles usados tiene un volumen de 64100 gal y al convertirlo al sistema internacional es de 242,64 m³.

El total de los sistemas auxiliares es de **927,8 m³**.

Solución de boro

El estanque de solución de boro es de 150 gal que equivalen a **0,57 m³**.

Purga de los generadores de vapor

El flujo másico total de vapor por los generadores de vapor es de 14,79·10⁶ lb/h que en el sistema internacional equivalen a 6,79·10⁶ Kg/h. Se considera que la purga corresponde a un 1% del flujo por el generador de vapor, por lo tanto, sería de 6,79·10⁴ Kg/h. Considerando una densidad del agua a 25°C de 997,045 Kg/m³ [\[RHP01\]](#), tenemos que se necesitan **68,1 m³/h**.

Remoción de calor residual

Si bien, el caudal total de remoción de calor residual es de 1500 gpm (340,69 m³/h) se asumirá que la reposición para este sistema, que opera con el reactor detenido o a baja potencia, será de un 0,1% del total, es decir, **0,34 m³/h**.

Consumo en operación

Se estima que el consumo durante el arranque es de 520 gpm que son **118,1 m³/h** en sistema internacional. Debido a los consumos en operación se hace necesario reponer la totalidad del volumen de agua de los sistemas cada año. Esto corresponde a **0,15 m³/h**.

Volumen de líquido total necesario para la primera puesta en marcha: 3859,86 m³.

Volumen de líquido total necesario para reponer anualmente: 1286,62 m³.

Flujo necesario de reposición de agua: 118,1 m³/h.

Este flujo de reposición se refiere exclusivamente a la reposición de agua durante la operación del sistema de remoción de calor residual, el cual opera cuando el reactor está detenido o en operación a baja potencia. Cuando el reactor está operando a potencia normal, este flujo es utilizado para la reposición de fugas y pérdidas por evaporación de los sistemas.

Tomando un factor de seguridad del 20% podemos decir que estos valores que modifican a:

Volumen de líquido total necesario para la primera puesta en marcha: **4631,83 m³**.

Volumen de líquido total necesario para reponer anualmente: **1543,94 m³**.

Flujo necesario de reposición de agua: **141,72 m³/h**.

Anexo 3: Procedimiento de cálculo para las resinas de intercambio iónico

Se utilizará el procedimiento de cálculo de resinas descrito en la bibliografía [{CM01}](#) utilizando unidades en el sistema internacional.

Primero se determina el volumen total a tratar entre regeneraciones, usando el caudal del sistema, Q. $V=Q \cdot \text{horas de operación entre regeneraciones}$.

Luego se calcula el volumen necesario de resina, usando el volumen recién calculado y la cantidad de iones en el agua a tratar, en equivalentes por litro.

$$V_{\text{res}} = \frac{\text{concentración iones} \left[\frac{\text{eq}}{\text{L}} \right] \cdot V}{\text{capacidad resina} \left[\frac{\text{eq}}{\text{L}} \right]}$$

La sección del lecho de la resina se calcula con un parámetro conocido como flujo permitido, que es el flujo máximo por unidad de superficie.

$$A = \frac{Q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \right]}{\text{flujo permitido} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{hr} \cdot \text{m}^2} \right]}$$

El diámetro del tanque se calcula a partir de esta área, usando: $D = \sqrt{\frac{A}{0,785}}$. La profundidad

del lecho de resina se obtiene por: $h = \frac{V_{\text{res}}}{A}$. Finalmente, la profundidad del tanque es calculada como la suma de varios factores:

$$H = h + \text{profundidad lecho soporte} + \text{factor expansión lecho}$$

A esta altura final se le agrega un 20% adicional como margen de seguridad.

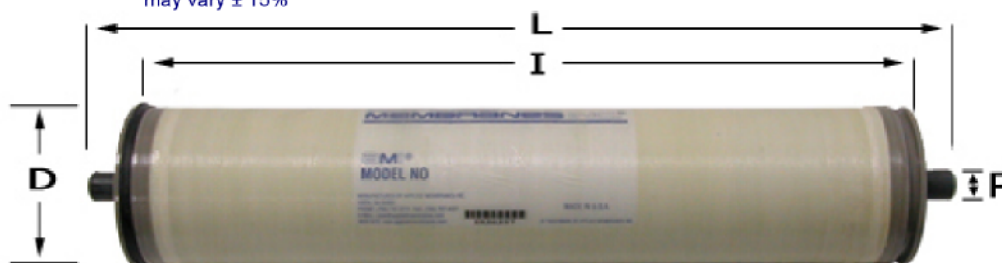
Anexo 4: Membrana de ósmosis inversa

AMI[®] MEMBRANES
4" SEAWATER FRP WRAPPED THIN FILM ELEMENTS

PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Model No.	Permeate Flow Rate		Minimum Salt Rejection %	Stabilized Salt Rejection (%)
	Gals/Day	M3/DAY		
M-S4021A	800	3.03	99.2	99.4
M-S4040A	1,950	7.38	99.2	99.4

Note: Performance specifications based on, 32,000 mg/l sodium chloride, 800 psi (5.5 MPa) applied pressure, 77°F (25°C) feed water temperature, pH 8 and % recovery as indicated below. Element permeate flow may vary ± 15%



RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Maximum applied pressure	1,000 PSI (6.9 MPa)
Maximum feed flow rate	18 gpm (4.1 m3/Hr.)
Maximum operating temperature	113°F (45°C)
Maximum feed water turbidity	1 NTU
Maximum feed water silt density index (15 min)	5
Chlorine tolerance	<0.1 ppm
Feed water pH range, Continuous Operation	2-11
Feed water pH range, Short-Term Cleaning (30 Minutes)	1-12
Single Element recovery percent: M-S4021A	4
Single Element recovery percent: M-S4040A	8

DIMENSIONS

Model No.	L		I		D	
	Inches	MM	Inches	MM	Inches	MM
M-S4021A	21	533	19	483	3.9	99
M-S4040A	40	1,016	38	965	3.9	99

Applied Membranes, Inc. assumes no liability for results obtained or damages incurred through the improper application of the above information and data.

APPLIED MEMBRANES INC.

AMI[®] APPLIED MEMBRANES INC.[®] APPLIED[®]
are trademarks of APPLIED MEMBRANES, INC.

2325 Cousteau Ct., Vista, CA 92081
 (760) 727-3711 • FAX (760) 727-4427
 Sales@appliedmembranes.com • www.appliedmembranes.com

© 2004 Applied Membranes, Inc.

Important Operating Information

1. Elements must be kept sealed and moist when in storage. Drying out will irreversibly damage the membranes.
2. Prevent elements from freezing, or being exposed to direct sunlight.
3. Elements are shipped in sealed bags and contain a preservative solution of 1-2% (by weight) of sodium meta bisulfite (Food Grade).
4. Discard the permeate from the first hour of operation.
5. Permeate flow varies with feed water temperature. Divide the rated flow with the correction factor below to get the permeate flow at that temperature.

Temperature		Correction Factor
°C	°F	
5	41.0	2.58
6	42.8	2.38
7	44.6	2.22
8	46.4	2.11
9	48.2	2.00
10	50.0	1.89
11	51.8	1.78
12	53.6	1.68
13	55.4	1.61
14	57.2	1.54
15	59.0	1.47
16	60.8	1.39
17	62.6	1.34
18	64.4	1.29
19	66.2	1.24
20	68.0	1.19
21	69.8	1.15
22	71.6	1.11
23	73.4	1.08
24	75.2	1.04
25	77.0	1.00
26	78.8	0.97
27	80.6	0.94
28	82.4	0.91
29	84.2	0.88
30	86	0.85

6. Membrane Elements for residential systems have a one year warranty from the date of shipment. Warranty is void for membrane elements fouled by suspended solids, precipitates or biological growth. Membrane warranty is also void if the membrane elements are improperly used, poorly maintained or improperly stored.
7. Applied Membranes' obligation under this warranty is limited to and shall be fully discharged by repairing or replacing any defective part FOB its works. Applied Membranes shall not be liable for damages or delay caused by defective material. Please refer to detailed warranty information.
8. Warranty claims for membrane elements must be made as detailed in Membrane Warranty Claims Bulletin.

Anexo 5: Resinas de intercambio iónico

AMBERLITE™ IRC86RF Industrial grade weak acid cation exchanger

DESCRIPTION:

AMBERLITE™ IRC86RF is a high capacity weak acid cation exchange resin containing carboxylic acid groups on an acrylic matrix, designed to remove hardness associated with alkalinity. Combined with a strong acid cation exchanger for total de-cationization, it reduces acid consumption and offers maximum exchange capacity. AMBERLITE™ IRC86RF is produced with a specific particle size to give optimum performance in packed and floating bed applications.

USED IN:

- Dealkalization of industrial waters
- First step of an industrial water demineralization train
- Partial or total water softening (depending on water composition)

ADVANTAGES:

- High capacity
- Excellent mechanical stability
- Removes many heavy metals

PROPERTIES:

Typical Properties

These properties are typical but do not constitute specifications.

Physical form	Clear amber spherical beads
Matrix	Gel polyacrylic copolymer
Functional group	Carboxylic acid
Ionic form as shipped	H ⁺
Total exchange capacity ^[1]	≥ 4.10 eq/L (H ⁺ form)
Moisture holding capacity ^[1]	47 to 53% (H ⁺ form)
Shipping weight	790 g/L
Particle size	
Uniformity coefficient ^[1]	≤1.5
Harmonic mean size ^[1]	0.600 to 0.800 mm
< 0.300 mm ^[1]	0.1% max
Reversible swelling (total conversion)	H ⁺ → Na ⁺ ≤ 100% H ⁺ → Ca ⁺⁺ ≤ 15% H ⁺ → Mg ⁺⁺ ≤ 50%

^[1] Contractual value

Test methods are available on request.

AMBERLITE™ IR120 H Industrial grade strong acid cation exchanger

DESCRIPTION:

AMBERLITE™ IR120 H resin is a gel type strongly acidic cation exchange resin for use in water demineralization applications.

USED IN:

- Water demineralization with co-flow regeneration

ADVANTAGES:

- One of the most popular cation resins on the market
- Good physical, chemical and thermal stability
- Good ion exchange kinetics
- High exchange capacity

PROPERTIES:

Typical Properties

These properties are typical but do not constitute specifications.

Physical form	Amber spherical beads
Matrix	Styrene divinylbenzene copolymer
Functional group	Sulfonic acid
Ionic form as shipped	H ⁺
Total exchange capacity ^[1]	≥ 1.80 eq/L (H ⁺ form)
Moisture holding capacity ^[1]	53 to 58% (H ⁺ form)
Shipping weight	800 g/L
Particle size	
Uniformity coefficient	≤ 1.8
Harmonic mean size ^[1]	0.620 to 0.830 mm
< 0.300 mm ^[1]	2% max
Maximum reversible swelling	Na ⁺ → H ⁺ : ≤ 11%

^[1] Contractual value

Test methods available upon request.

AMBERLITE™ IRA92 Industrial grade weak base anion exchanger

DESCRIPTION:

AMBERLITE™ IRA92 resin is a high capacity polystyrene, weak base anion exchanger. The high total capacity of this resin makes it particularly suitable for the removal of strong anions from solutions with relatively high dissolved solids; its regeneration efficiency is close to the theoretical output.

USED IN:

- Removal of mineral acidity after cation exchange
- Combines ideally with a strong base anion exchange resin for total demineralization

ADVANTAGES:

- Reversible uptake of organic matter from surface water
- High capacity and regeneration efficiency
- Excellent adsorption and desorption of organic matter
- Outstanding mechanical and osmotic stability

PROPERTIES:

Typical Properties

These properties are typical but do not constitute specifications.

Physical form	Ivory-colored spherical beads
Matrix	Macroporous polystyrene
Functional group	Secondary amine: at least 80%
Ionic form as shipped	Free Base (FB)
Total exchange capacity ^[1]	≥1.60 eq/L (FB form)
Moisture holding capacity ^[1]	40 to 50% (FB form)
Shipping weight	660 g/L
Specific Gravity	1.035 to 1.065 (FB form)
Particle size	
Uniformity coefficient	≤1.8
Harmonic mean size	0.580 to 0.780 mm
< 0.355 mm ^[1]	3% max
Maximum reversible swelling	FB → Cl ⁻ : 25%
^[1] Contractual value	

AMBERLITE™ IRA402 Cl Industrial grade strong base anion exchanger

DESCRIPTION:

AMBERLITE™ IRA402 Cl resin is a type 1 strongly basic, clear gel, anion exchange resin. In demineralization applications, this resin can remove both strong and weak acids including silica, making it an excellent general purpose anion exchange resin for a wide variety of water treatment applications.

USED IN:

- Industrial water demineralization
- Removal of Fe_{3+} and Zn_{2+} from HCl

ADVANTAGES:

- Robust demineralization product
- Offers optimum balance of capacity and regeneration efficiency
- Excellent general purpose anion exchange resin
- Works across a wide variety of water treatment applications

PROPERTIES:

Typical Properties

These properties are typical but do not constitute specifications.

Physical form	Pale yellow translucent spherical beads
Matrix	Styrene divinylbenzene copolymer
Functional group	Trimethyl ammonium
Ionic form as shipped	Chloride
Total exchange capacity ^[1]	≥ 1.20 eq/L (Cl ⁻ form)
Moisture holding capacity ^[1]	49 to 60% (Cl ⁻ form)
Shipping weight	670 g/L
Particle size	
Uniformity coefficient ^[1]	≤ 1.6
Harmonic mean size ^[1]	0.600 to 0.750 mm
< 0.300 mm ^[1]	1.0% max
Reversible swelling	Cl ⁻ → OH ⁻ ≤ 30%
^[1] Contractual value	

Anexo 6: Alternativa de funcionamiento usando agua de mar

Aquí se presenta un esquema muy simplificado de cómo podría ser ese proceso, basado principalmente en el sistema descrito en la descripción del reactor AP1000 [{NRC01}](#).

Para determinar la calidad de agua inicial que entrará en la planta se considerará agua de mar de la costa chilena de la región norte del país, lo que permite asumir una salinidad en torno al 3.45-3.5% (34.5-35ppt) [{SFW01}](#), de acuerdo la siguiente figura:

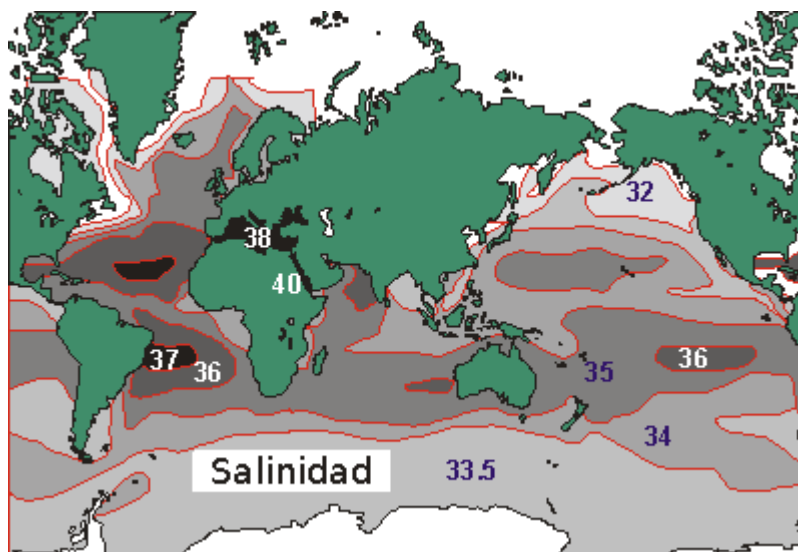


Figura 14: Salinidad de los océanos, en ppt

De acuerdo a esta información podemos considerar el agua de mar con una composición correspondiente a una salinidad aproximada a 3.45% y valor de pH aprox. 7,9 a 8,3, estos valores corresponden al agua de mar de tipo genérico con esta salinidad, no específicamente la composición en la costa de Chile. Estos valores se pueden resumir en la tabla siguiente [{HIC01}](#):

Componente	Cantidad	Unidad
Cloruro de sodio	24,000	gr
Cloruro de magnesio	5,000	gr
Sulfato de sodio	4,000	gr
Cloruro de calcio	1,100	gr
Cloruro de potasio	0,700	gr
Bicarbonato de sodio	0,200	gr
Bromuro de sodio	0,096	gr
Ácido bórico	0,026	gr
Cloruro de estroncio	0,024	gr

<i>Componente</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>
Fluoruro de sodio	0,003	gr
Agua destilada	1000	ml

Descripción del sistema de potabilización de agua de mar

El sistema de potabilización de agua de mar está formado por los siguientes componentes principales:

1. Filtro de arena con capacidad del 100% para la remoción de partículas de gran tamaño presentes en el agua de mar.
2. Cartuchos de microfiltración para remover las partículas finas en el agua que podrían causar fouling en las membranas que se encuentran aguas abajo.
3. Bombas de alta presión para el funcionamiento de las membranas de ósmosis inversa.
4. Membranas de ósmosis inversa para la remoción del exceso de sales presentes en el agua de mar.

Operación del sistema

Se toma agua desde el mar por medio de bombas y se la pasa a través de una reja de filtro primario tal que los objetos mayores de 6,35mm queden retenidos. Se le agregan biocidas y floculantes (Rocide IS2 [{AVI01}](#) y Roquest 4000 [{AVI02}](#)), suponiendo una turbidez <10NTU, para controlar los microorganismos y separar más fácilmente los sólidos suspendidos. Se pueden ver las características de estos productos en el [anexo 7](#).

Luego, el agua se circula a través de un filtro de arena para remover las partículas grandes y posteriormente se hace pasar por un sistema de ultrafiltración, para remover los sólidos pequeños, siendo esta la última etapa anterior a las membranas.

A la salida de la ultrafiltración, el agua entra a una bomba de alta presión que la impulsa a través de las membranas de ósmosis inversa, donde los iones son separados del agua y se obtiene el agua purificada que se envía hacia el sistema de tratamiento de agua desmineralizada.

Descripción del Sistema de Tratamiento de Agua Desmineralizada

Este sistema está formado por los siguientes componentes principales:

1. Dos filtros de tipo cartucho cada uno con capacidad del 100%, en configuración en paralelo ubicadas antes de las unidades de ósmosis inversa. Estos filtros remueven las partículas tales como sedimentos e incrustaciones de las cañerías, que podrían bloquear las membranas de ósmosis inversa. Normalmente un filtro está en operación, mientras que el otro está en modo Stand-by.

2. Bombas centrífugas de alta presión y capacidad del 100% alimentan cada unidad de ósmosis inversa. La bomba mantiene el flujo y la presión a través de las membranas, dado que la efectividad de la membrana se modifica de acuerdo a la temperatura del agua.

3. Las membranas de ósmosis inversa, de 100% de capacidad, operan en serie para la desmineralización primaria. La unidad consiste en un arreglo de membranas en 2 etapas. Cada arreglo contiene membranas delgadas de film compuesto encapsulados en recipientes de presión de plástico reforzado con fibra de vidrio. El ensamble de las membranas de ósmosis inversa es de construcción modular, con capacidad de ser expandida. La disposición de las tuberías del arreglo permite que una o más filas de un arreglo de membranas estén fuera de servicio mientras el resto del arreglo está en operación.

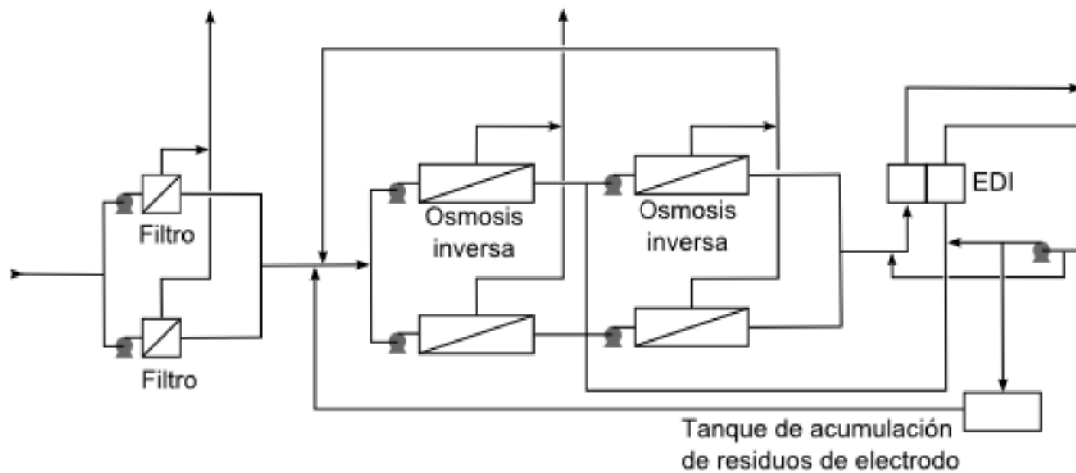


Figura 15: Diagrama de flujo del sistema de tratamiento de agua desmineralizada

Las válvulas de aislación manual están incorporadas en las líneas de alimentación, del producto y de la salmuera de rechazo entre los arreglos. También hay válvulas de toma de muestras en las salidas de producto y de salmuera para cada recipiente de presión.

Un sensor de presión en la salida del producto protege las membranas de la sobrepresión, dando la alarma y apagando la unidad de membranas.

4. Se cuenta además con una unidad de electrodeionización para la desmineralización secundaria y la remoción de CO_2 disuelto. La unidad de electrodeionización está compuesta por pilas de componentes múltiples. Cada componente contiene pares de celdas de membranas que van una al lado de la otra. Un par de celdas consiste de un canal de flujo de producto (liberador de iones) entre dos membranas (una catiónica y una aniónica) y otro canal de salmuera (concentrador de iones) ubicado alternativamente entre los pares de celdas. Un potencial de corriente continua se mantiene entre los electrodos que se encuentran en

extremos opuestos de la pila de pares de celdas. Se tiene resina de intercambio iónico en el canal de flujo del producto actuando como un medio selectivo de iones en el proceso de electrodeionización. También hay válvulas de aislación para cada componente de las pilas para permitir la mantención de una pila sin remover la unidad de electrodeionización del servicio.

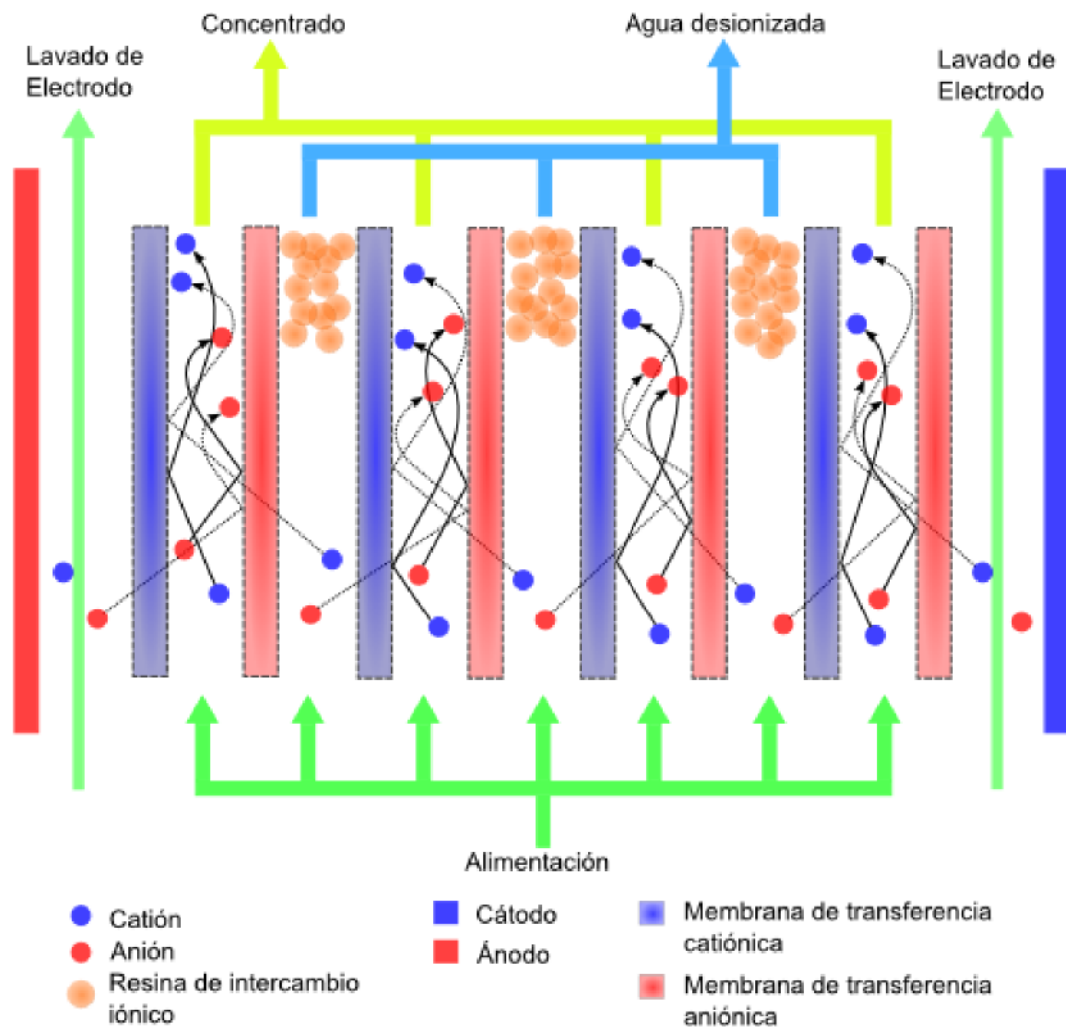


Figura 16: Funcionamiento de la unidad de electrodeionización

La unidad de electrodeionización incluye dos bombas centrífugas para la salmuera que mantienen un flujo continuo en el ciclo cerrado de la salmuera y purga las impurezas iónicas de los canales de salmuera en las pilas de celdas.

Anexo 7: Biocidas y floculantes para agua de mar



RoCide® IS2 Non-Oxidising Biocide Product Datasheet

Performance:

RoCide® IS2 offers a variety of performance benefits:

- Broad-spectrum biocide that kills bacteria, fungi, and algae.
- Compatible with polyamide and cellulose acetate membranes.
- Degrades rapidly and naturally to comply with strict environmental discharge regulations.
- Can be used in conjunction with other applicable Avista Technologies chemicals.
- Is removed from the RO permeate stream by ultraviolet sterilization (UV) and mixed bed ion exchange treatment.

RoCide® IS2 is an extremely effective, non-oxidizing biocide based on a 1.5% isothiazolin mixture. It is a broad-spectrum formulation for use against microbiological contaminants commonly found in RO applications including bacteria, fungi, and algae.

RoCide® IS2 is designed to be fed continuously to the reverse osmosis system feedwater and may be used alone or in conjunction with another Avista biocide; RoCide® DB-20.

Alternatively, RoCide® IS2 can be applied intermittently and it is also highly effective as a preservative.

This chemical is formulated specifically for RO systems and is to be used in non-potable applications only.

Use Instructions:

For continuous dosing, RoCide® IS2 should be injected into the RO feedstream at an initial dose of 15 ppm. This dosage should be continued for one to two weeks. After this period, bacterial counts in the feed and concentrate streams may be used to determine when the dosage can be reduced, typically to 5 ppm or less.

Microbiological control is generally achieved when the concentrate bacteria counts fall below those found in the feedstream (taking the concentration factor into account).

Alternatively, RoCide IS2 can be applied intermittently at 50-100ppm for 4-6 hours per week. It is also highly effective for train preservation with the above dose controlling biological growth in offline trains for extended periods.

Packaging and Storage:

Standard regional pack sizes are listed below. Custom packaging can be provided worldwide to meet customer needs. Information on drumless or bulk tanker delivery is available on request.

Specifications		Packaging Formats	Americas	EMEA
Appearance:	Pale blue/green	Pails	45 lbs	25 kg
pH (as supplied):	1.5 - 3.0	Drums	475 lbs	200 kg
Specific Gravity@20°C	1.05±0.05	IBC's (totes)	2200 lbs	1100 kg

1Q/08



Avista Technologies, Inc.
Phone: +1 760 744 0536
Info@avistatech.com

Avista Technologies (UK) Ltd.
Phone: +44 131 449 6677
Info@avistatech.co.uk

Visit www.avistatech.com for a list of global offices and distributors.



RoQuest® 4000
Coagulant Product Datasheet

Performance:

RoQuest® 4000 provides unique performance and application benefits:

- Contains more than 8% soluble ferric ion and less than 0.2% ferrous ion.
- Certified by United Laboratories to ANSI/NSF 60 for use in systems producing potable water.
- Capable of producing RO quality feedwater in multimedia and sand filtration applications
- Compatible with thinfilm (polyamide) and cellulose acetate RO membranes.
- Filter-aid properties resist solids breakthrough in direct filter applications.
- Low dosage requirements
- Compatible with Vitec® 3000, 5000 & 7000 scale inhibitors.
- Effective over a wide pH range.

RoQuest® 4000 contains a blend of organic coagulants and ferric sulfate and is designed to be injected into the feedstream of multimedia and sand filters. This product will enhance the filter performance by further reducing turbidity and color, producing an effluent that is a more acceptable feedwater quality to downstream reverse osmosis systems.

Best results are achieved in raw waters that contain up to 10 NTU turbidity and color units of greater than 10 or in feedwaters in which organic polymers have been under or overdosed.

Use Instructions:

Inject RoQuest® 4000 at least 15 feet (5m) upstream of multimedia filters. Do not use static mixers ahead of the filters as the shear imparted by this equipment will degrade the polymers contained in this formulation.

Dosing Guidelines:

Typical RoQuest® 4000 dosage is in the range of 2 to 25 ppm. Approximately 0.25 ppm of alkalinity expressed as calcium carbonate is required per ppm of RoQuest® 4000. Following coagulant addition, a minimum of 25 ppm of residual alkalinity is required.

Significant overdosing of RoQuest® 4000 may cause degradation in the quality of the filtered water. If there are any questions, please contact Avista Technologies for specific dosing instructions.

Dilution:

RoQuest® 4000 should be fed neat if possible. If a dilution is necessary, dilute no more than 4 to 1 with RO permeate or DI water.

Packaging and Storage:

Standard regional pack sizes are listed below. Custom packaging can be provided worldwide to meet customer needs. Information on drumless or bulk tanker delivery is available on request.



DRINKING WATER TREATMENT ADDITIVES CLASSIFIED BY NSF INTERNATIONAL TO NSF/ANSI 60 ON JUNE 2005 AS STANDARD DRINKING WATER TREATMENT CHEMICAL AT A MAXIMUM LEVEL OF 285 mg/l.

Specifications	
Appearance:	Clear brown liquid
pH (1% solution):	4.0 - 6.0
Specific Gravity@20°C:	1.3-1.4

Packaging Formats	Americas	EMEA
Pails	45 lbs	23 kg
Drums	500 lbs	220 kg
IBC's (tote bins)	2500 lbs	1100 kg

10/08



Avista Technologies, Inc.
Phone: +1 760 744 0536
Info@avistatech.com

Avista Technologies (UK) Ltd.
Phone: +44 131 449 6677
Info@avistatech.co.uk

Visit www.avistatech.com for a list of global offices and distributors.