



Compendio OCTI - abril de 2022

Redes Hidráulicas. Nuevas tecnologías para el uso del agua de mar en el consumo industrial y humano.

Compendio OCTI - abril de 2022

Redes Hidráulicas. Nuevas tecnologías para el uso del agua de mar en el consumo industrial y humano.

Observatorio Científico, Tecnológico y de Innovación – OCTI

Disponible en: <http://www.octi.cu>

REDACCIÓN

Gladys Ayala Peña*

Gloria Aguirre Fera*

* Centro de Información y Gestión Tecnológica Holguín
(IDICT - CIGET).

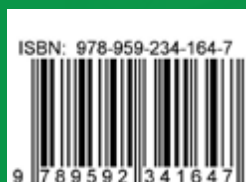
REVISIÓN

Roelvis Ortiz Núñez

Yudayly Stable Rodríguez

DISEÑO EDITORIAL

Patricia Larrea Ortiz



© **Instituto de Información Científica y Tecnológica – IDICT**

Calle 18A entre 41 y 47. Reparto Miramar, Municipio Playa.

La Habana, Cuba.

Teléfono: (07) 2031851

Está permitida la reproducción total o parcial de esta obra y su difusión telemática siempre y cuando sea para uso personal de los lectores y no con fines comerciales.

La Habana, abril de 2022

Contenido

Introducción	4
1. Sistemas de captación de agua de mar	6
1.1. Captaciones abiertas de agua de mar	6
1.2. Captaciones cerradas de agua de mar	9
2. Desalinización del agua. Convertir el agua de mar en agua potable	15
2.1. Datos importantes de los procesos de desalinización	16
2.2. Procesos térmicos	16
2.3. Procesos de membrana	18
3. Desalación del agua por ósmosis inversa (RO)	21
4. Aplicaciones en industrias de la ósmosis inversa (RO)	23
4.1. ¿Qué industrias utilizan agua tratada con ósmosis inversa (RO)?	23
5. Una tecnología que multiplica la eficiencia de las plantas desalinizadoras: desionización capacitiva	27
6. Sistemas de captación en desaladoras de agua de mar	28
6.1. Tomas abiertas	29
7. Desalinización sostenible: electroquímica microbiana para obtener agua potable con bajo coste energético	42
7.1. Tecnologías de desalinización y emisiones de CO ₂	42
7.2. Biotecnología para desalinización sostenible	44
8. Los beneficios de la desalinización descentralizada	45
Referencias	46

Introducción

El agua es un bien esencial para la vida y el desarrollo económico de las poblaciones. Entre otras, las actividades industriales, agrícolas y ganaderas giran en torno a la disponibilidad y calidad del recurso hídrico.

Se estima que las dos terceras partes del planeta están cubiertas por agua. Sin embargo, no toda esta agua es apta para el consumo humano y no toda la población del mundo tiene las mismas posibilidades de acceso a este recurso vital.

El 97.5% del agua se encuentra en mares y océanos en forma salada, lo que la hace a priori inútil para la alimentación, la agricultura y la mayor parte de los usos industriales. El 2.5% del agua restante es dulce, pero casi toda ella está en los hielos de los polos o glaciares, en depósitos subterráneos o en otros lugares de difícil utilización. Por todo esto, sólo un 0.26% de la masa total de agua del planeta es fácilmente aprovechable para los usos humanos (figura 1).

Los mares y océanos son solo el 0,023% de la masa total del planeta

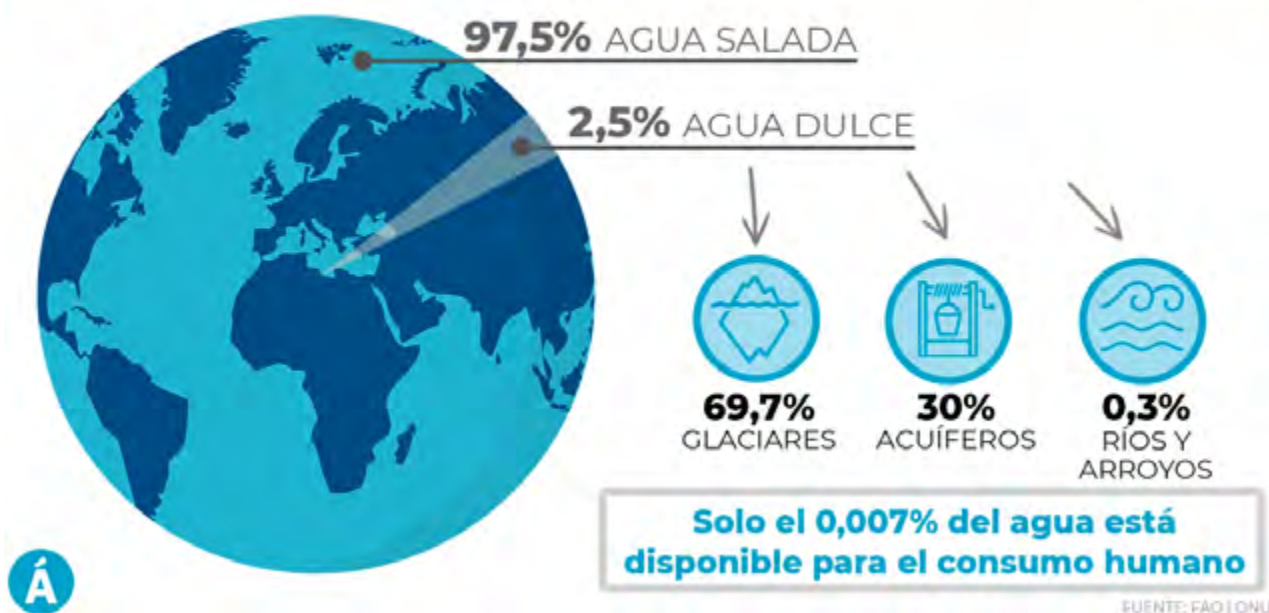


Figura 1. Disponibilidad de agua dulce. / Tomado de El Ágora Diario.

Por otro lado, esta pequeña proporción de agua está sufriendo un acelerado proceso de pérdida de calidad y cantidad. Por ejemplo, más de la mitad de los principales ríos del planeta están gravemente agotados y contaminados, por lo que degradan y contaminan los ecosistemas y amenazan la salud y el sustento de las personas que dependen de ellos. Así mismo, en las zonas en las que existe un fácil acceso a este recurso se realiza un consumo excesivo y poco racional.

La falta de recursos se incrementará con el paso del tiempo. Actualmente 1200

millones de personas viven en países que padecen escasez de agua. En el año 2025, cuando la población haya crecido en unos 3000 millones de habitantes, se estima que esta cifra puede llegar a 3400 millones, más de la mitad de la población mundial actual. Zonas especialmente vulnerables serán Oriente Medio, África y sur y oeste de Asia, donde se deberá hacer frente a sequías mortales y lluvias torrenciales cada vez con mayor asiduidad debido al cambio climático. Naciones Unidas señala que los efectos de este sobre el ciclo de agua en la Tierra

hacen que el futuro de agua potable sea más precario que nunca.

La vida nació en el mar, sin embargo, cuando hablamos del binomio -agua y vida- damos por sentado que hablamos del agua dulce, marginando al agua de mar; y ello seguramente, por la existencia de firmes prejuicios y a priori generalizados sobre el agua de mar, de la que se dice que no se puede beber porque perjudica a la salud, que no se puede usar sin tratar o que no sirve para regar, todas ellas afirmaciones falsas.

El agua de mar no es agua con sal, es el nutriente orgánico más completo que existe en la naturaleza. Compuesto por ácidos nucleicos, aminoácidos esenciales, grasas y minerales; además de fitoplancton y zooplancton, proteínas -kril/omega 3-, huevos y larvas de peces, cadenas de carbono, y diez mil millones de virus y nueve mil millones de bacterias no patógenas, por cada litro de agua de mar, con un ph. de 8.4.

El agua de mar, biodisponible, gratis, abundante, de fácil extracción y al alcance de todo el mundo, puede contribuir a romper el círculo vicioso de la pobreza y de la desigualdad en muchos lugares del planeta, contribuyendo también de manera significativa a paliar los efectos derivados de la escasez de agua dulce, cada día más acuciantes como consecuencia del cambio climático. Sus propiedades, amplias y polivalentes, permiten su utilización para muchos otros usos, más allá de los vinculados con la nutrición y salud.

Aunque desconocido por la gran mayoría, el agua de mar se ha utilizado desde tiempos ancestrales para el uso agrícola y ganadero. Una agricultura con base en el agua de mar, permite ahorrar agua dulce, reducir la aplicación de fertilizantes y productos fitosanitarios, conseguir alimentos con un

mayor valor nutricional y mejorar suelos degradados. La agricultura con agua de mar representa también una oportunidad para la mejora de las condiciones de vida de muchos pueblos y comunidades campesinas. Es una clara alternativa para alcanzar la soberanía alimentaria de los pueblos, y para hacer de esta actividad, una actividad sostenible que no comprometa el futuro del planeta y de las generaciones venideras.

El 55% del agua de mar es cloro, esto la convierte en un desinfectante natural, perfecta para el tratamiento y desinfección, tanto en aguas para consumo humano y animal, así como en la desinfección de sistemas de desagües, fosas sépticas, pozos de vertido de basuras, etc. Ningún virus o bacteria de procedencia terrestre puede sobrevivir en el mar.

- El compendio se realiza con el objetivo de brindar información y conocimientos a los actores principales de recursos hidráulicos para lograr una utilización óptima del agua de mar. Para ello se utilizó como principal fuente de información el Google Académico, pues se considera una herramienta útil para este tipo de producto informativo, ya que su información se encuentra fundamentalmente en fuentes validadas. 

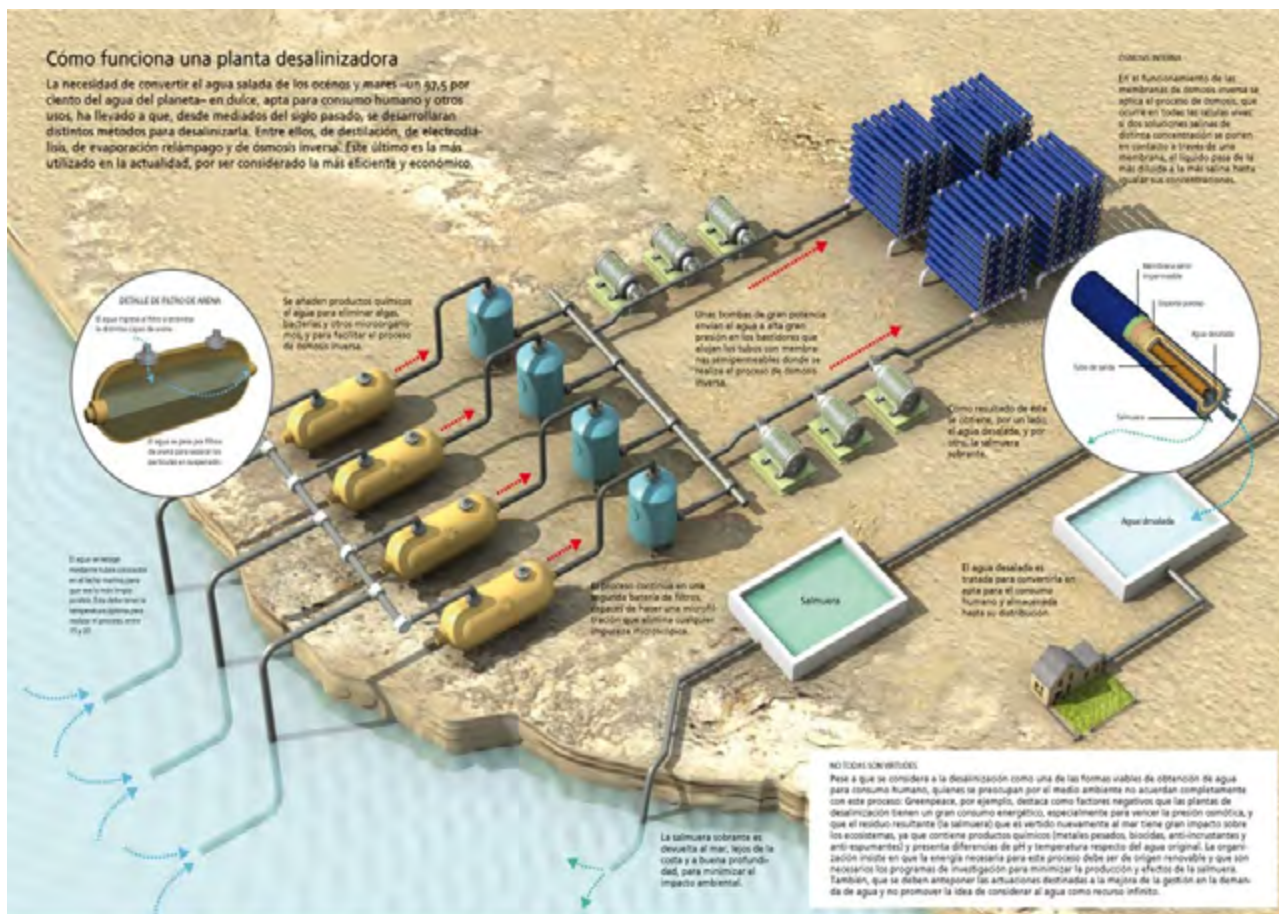


Figura 2. Esquema de planta desalinizadora con sistema de captación abierta. / Tomado de Quora.

1. Sistemas de captación de agua de mar

La utilización del agua de mar como fuente de recurso hídrico ha adquirido un importante auge debido, principalmente, a la mejora de las tecnologías empleadas en el proceso de desalación. Los sistemas de captación también han ido cambiando y mejorando con el transcurso de los años debido a la necesidad de adaptarse a las nuevas normativas ambientales, mejoras

tecnológicas y el aumento de calidad y eficiencia de las nuevas plantas.

En la actualidad, existen diversas alternativas de obras de captación de agua de mar, las que se clasifican en dos grandes grupos: captaciones abiertas y captaciones cerradas, donde el agua es captada mediante pozos o galerías de infiltración.

1.1 Captaciones abiertas de agua de mar

En las captaciones abiertas, el agua de mar es extraída directamente del océano mediante una tubería, elevada o sumergida, de largo que va desde los 300 hasta los 2.000 metros, o mediante un túnel horizontal. Este tipo de captación además debe considerar la construcción de un pozo húmedo, sentina u otro mecanismo para tener el sistema de bombas, y una estación de bombeo que

suele ubicarse en la costa ya que requiere de fácil acceso y conexión con la planta elevadora. Las alternativas existentes para las captaciones abiertas de agua de mar son:

- 1) Captaciones abiertas sumergidas.
- 2) Captaciones abiertas elevadas.
- 3) Captaciones abiertas directas.

1) Captaciones abiertas sumergidas

En estas captaciones la tubería de transporte va anclada o enterrada en el fondo marino. El agua de mar ingresa por una cámara con rejillas o pantallas ranuradas para luego ser acumulada en una sentina, desde donde es

llevada mediante un sistema de bombas a su destino (usualmente, la planta desaladora). Al extraer el agua directamente en el océano, tiene una capacidad ilimitada, dependiendo solamente del diámetro de la tubería y de la dimensión de la cámara de captación.

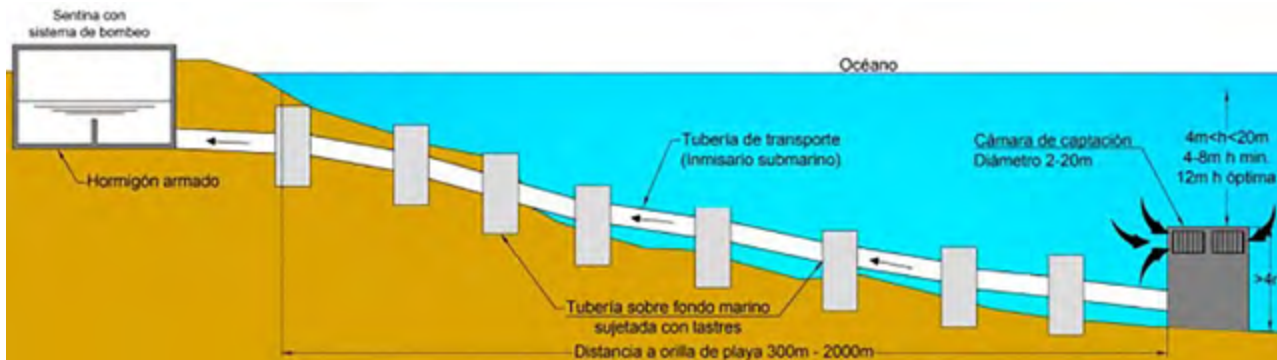


Figura 3. Esquema del sistema de captación abierta sumergida. / Tomado de Repositorio Institucional USM.

2) Captaciones abiertas elevadas

En algunos casos es posible reutilizar una estructura tipo muelle abandonada con el fin de reducir los costos iniciales y el impacto ambiental relacionado con la construcción del sistema de captación en el fondo marino. Este sistema de captación consiste en la instalación de una tubería de transporte en la estructura existente, una cámara de captación con las mismas características y condiciones de

desempeño que en las captaciones abiertas sumergidas, y una sentina de bombeo.

Al igual que en las captaciones abiertas sumergidas la capacidad es muy alta, dependiendo solamente del diámetro de la tubería y de la dimensión de la cámara de captación. Se debe tener en cuenta que el diámetro de la tubería dependerá de la estructura existente de soporte, por espacio y estado.

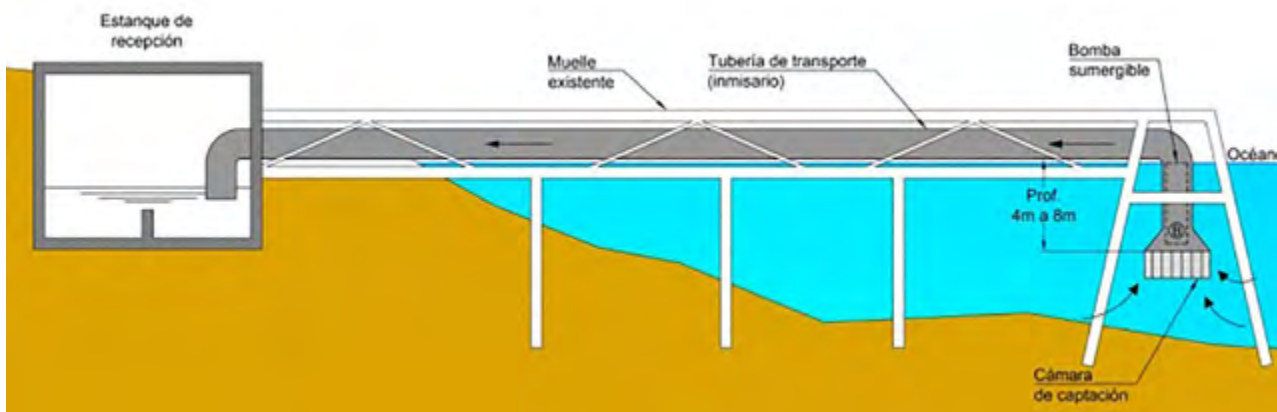


Figura 4. Esquema del sistema de captación abierta elevada. / Tomado de Repositorio Institucional USM.

3) Captaciones abiertas directas

Consisten en un depósito circular o cuadrado que se excava por debajo de la cota del agua de mar en el terreno y que se conecta al océano mediante un túnel horizontal natural o excavado. En la entrada al depósito

se instala una rejilla para evitar el ingreso de vida marina y desechos.

Se pueden instalar tanto en costas de arena con poco desnivel, como en costas rocosas, siendo esta última la condición más favorable, debido a que en el fondo rocoso

la acción de las olas normalmente no causa una agitación significativa de sedimento ni elevada turbidez. Para evitar el arrastre de desechos y espuma, en caso de ser posible, es preferible que la entrada de agua esté al

menos 2 m por debajo del nivel de marea baja. Pueden extraer un caudal menor que las captaciones abiertas sumergidas y elevadas, sin embargo, tienen mayor capacidad que las captaciones cerradas.

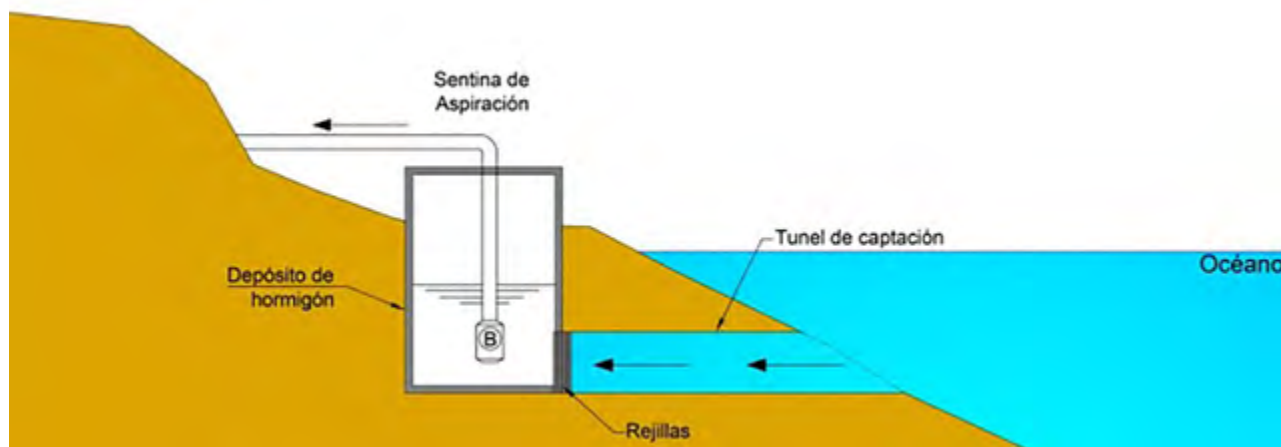


Figura 5. Esquema del sistema de captación abierta directa. / Tomado de Repositorio Institucional USM.

Recomendaciones generales para el diseño de captaciones abiertas

Se debe tener en cuenta los siguientes factores al seleccionar la ubicación de la captación abierta de agua de mar (Voutchkov, 2013):

1. El potencial de erosión de las playas en el área de captación.
2. Ubicación y dirección de las corrientes submarinas.
3. Presencia y ubicación de posibles fallas activas sísmicas.
4. Estudios de topografía y geología del suelo de la masa de agua (perfil batimétrico).
5. Estudio de la ubicación de biota marina sensible a lo largo de la ruta de la tubería de transporte y cerca de la entrada de la captación.
6. Ubicación y tamaño de descargas existentes de aguas residuales sanitarias e industriales dentro de un radio de 1 km de la entrada de la captación.
7. Estudio de las características de las olas (altura, longitud de onda, velocidad) y la profundidad de impacto de las olas.

8. Estudio de los tipos y características de las mareas, corrientes superficiales y profundas y vientos.
9. En el caso de las captaciones abiertas sumergidas, realizar estudio de los rasgos topográficos del fondo marino.
10. Tráfico de barcos y buques.

Las captaciones abiertas deben ser emplazadas lejos de áreas que presenten: erosión de las playas, fallas sísmicas activas, olas altas, fuertes corrientes submarinas que transportan desechos, limos, organismos microscópicos (plancton y zooplancton), pasto marino y materiales fibrosos y áreas con alto tráfico de buques y barcos pesados. Si el lugar corresponde a una zona de biota marina sensible, se debe modificar el lugar de instalación de la cámara de captación o la tubería de transporte debe ser instalada mediante perforación direccional o tunelera bajo el fondo marino.



Figura 6. Obras de excavación de un sistema de captación cerrada. / Tomado de iAgua.

1.2 Captaciones cerradas de agua de mar

En las captaciones cerradas, el agua de mar o salobre es extraída desde la orilla de las playas o sectores cercanos, a través de lechos de arena saturada u otros estratos subterráneos permeables. A diferencia de las captaciones abiertas, la capacidad de las captaciones cerradas es limitada por las condiciones geomorfológicas locales.

El uso de captaciones cerradas ofrece diversas ventajas ambientales y operacionales. El agua de mar recolectada mediante estas captaciones es pretratada naturalmente vía filtración lenta a través del suelo marino arenoso, por lo que usualmente contiene bajos niveles de sólidos, aceites, grasas, contaminantes naturales orgánicos y

organismos acuáticos, lo que reduce el costo de pretratamiento requerido y el impacto a la biota marina.

Existen diversos tipos de captaciones cerradas de agua de mar. En general, los más utilizados son:

- 1) Pozos playeros verticales.
- 2) Norias playeras.
- 3) Pozos playeros horizontales.
- 4) Pozos inclinados.
- 5) Pozos con perforación dirigida (PHD).
- 6) Pozos horizontales radiales.
- 7) Galerías de infiltración con cama filtrante.

1) Pozos playeros verticales

Son el tipo de captación cerrada más utilizado. El requerimiento clave para poder utilizar este tipo de captación, es la presencia de una formación de acuífero costero que sea adecuadamente permeable y que este hidráulicamente conectado al océano, de manera que el agua marina puede infiltrarse.

Este tipo de pozo es perforado verticalmente hacia la roca subyacente o hacia el sistema de acuífero costero no consolidado. Generalmente, se construye

mediante perforación e instalación de tubería de sostenimiento. Luego de terminar la perforación se instala un entubado, el cual se compone de una tubería superior unida a otra tubería que contiene cribas.

Entre la tubería de sostenimiento y el entubado se rellena con un empaque de grava seleccionada que actúa como medio filtrante, para finalmente retirar la tubería de sostenimiento. Entre la grava y la superficie se rellena con un sello sanitario, generalmente de hormigón, para prevenir la contaminación de la superficie.

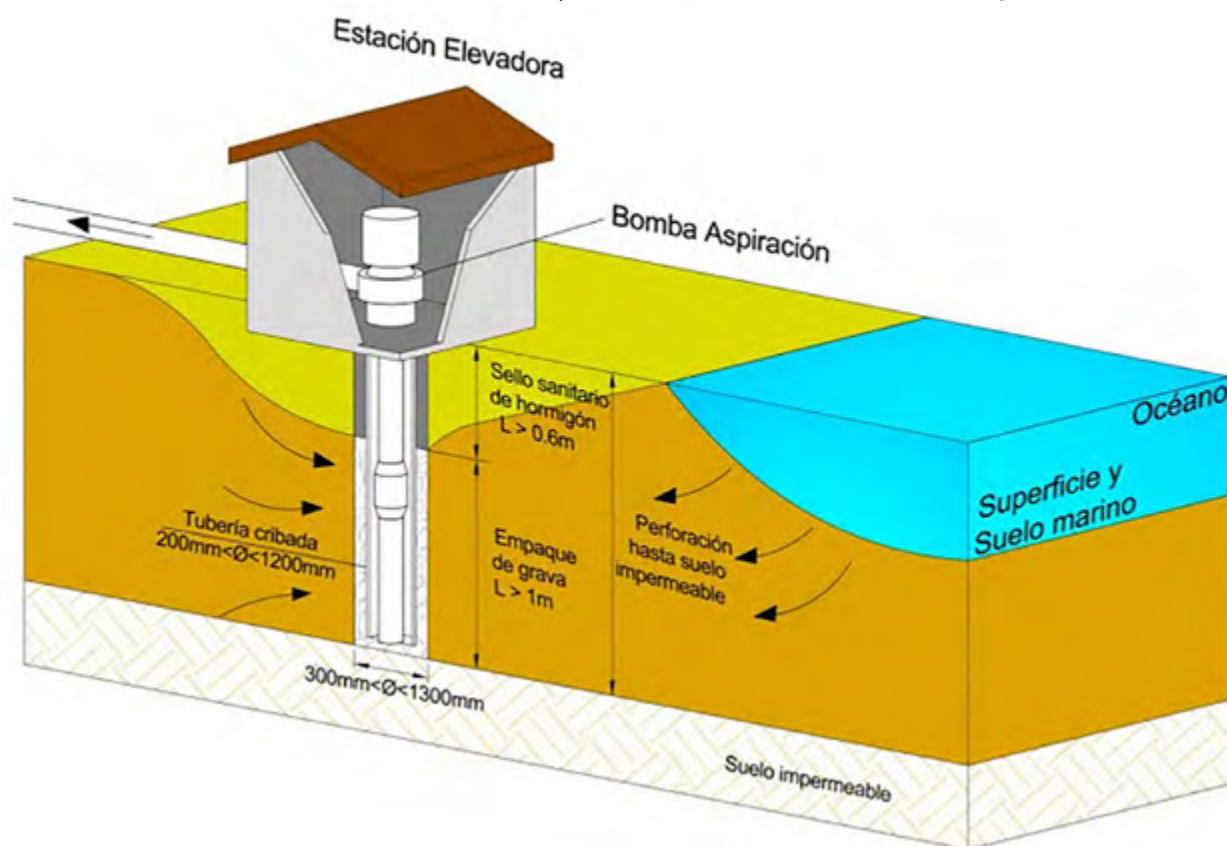


Figura 7. Esquema de un pozo playero vertical y sus componentes. / Tomado de Repositorio Institucional USM.

2) Norias playeras

Son pozos someros de profundidades inferiores a los 20 metros, donde el agua se extrae mediante bombas sumergibles. Generalmente, son construidas con revestimiento de hormigón y se instala alrededor un filtro de grava al igual que en los pozos playeros en un espesor de 50 cm.

Generalmente se excavan a mano, por lo que el diámetro no puede ser inferior

a 1,2 metros, pudiendo llegar hasta los 3 metros. Es recomendable emplazar las norias en sectores de la playa protegidos de la dinámica del océano. Los caudales obtenidos de las norias son inferiores a los obtenidos mediante pozos verticales playeros, pudiendo alcanzar como máximo 30 [L/s]. Se debe realizar una prueba de bombeo para poder determinar la capacidad máxima de la noria sin que esta se agote.

3) Pozos playeros horizontales

Constan de dos partes fundamentales: un pozo vertical de hormigón armado y fondo de hormigón en masa, y un conjunto de drenes horizontales ubicados en uno o más niveles, conectados con el pozo vertical en el cual desaguan a través de válvulas de compuerta. Pueden ser ubicados cercanos a la línea costera, sin embargo, los drenes pueden ser proyectados fuera de la zona de influencia de la playa y la anteplaya. Esto permite que el porcentaje de agua de mar que es extraído sea maximizado.

Los drenes de esta captación, al ser horizontales, pueden ser instalados en la zona del acuífero de mayor eficiencia hidráulica, por lo que en general tienen capacidades mayores que los pozos playeros verticales. La capacidad dependerá del diámetro y largo de los drenes que se utilicen. Para determinar con precisión la capacidad real de un pozo horizontal, se requiere realizar un ensayo de producción en cada dren por separado y un aforo del pozo completo, sin embargo, como dato referencial, se han instalado pozos horizontales que alcanzan una capacidad de hasta 200 [L/s].

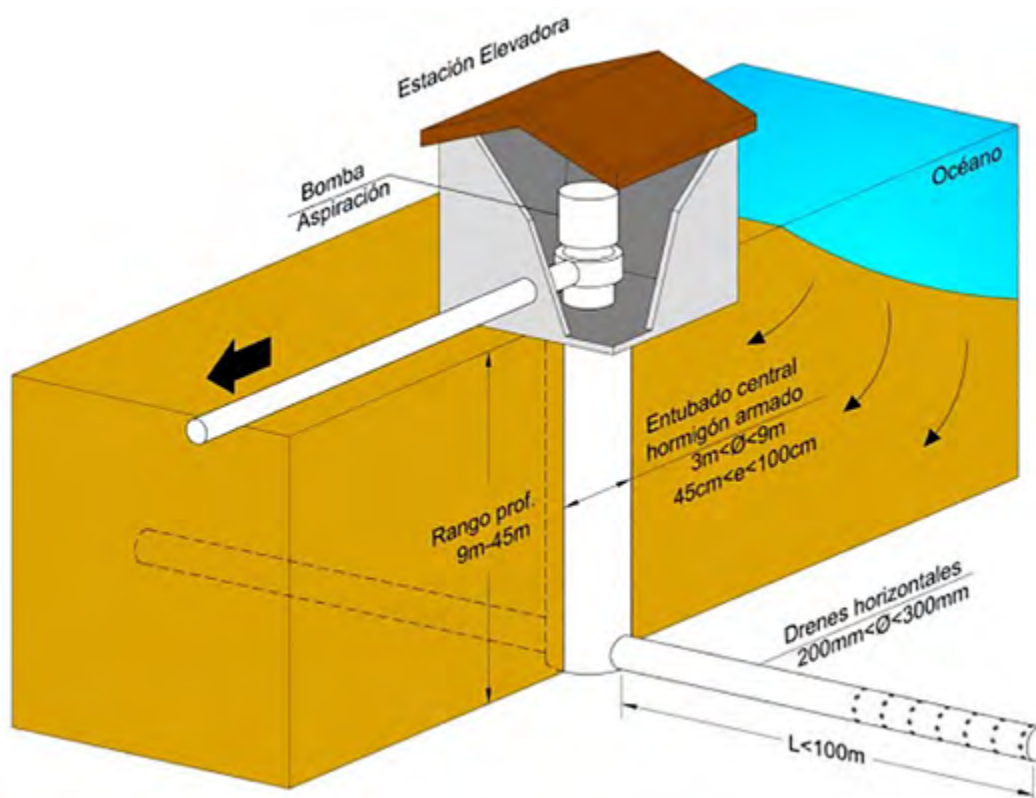


Figura 8. Esquema general del sistema de captación pozos horizontales. / Tomado de Repositorio Institucional USM.

4) Pozos inclinados

Son tuberías tipo dren construidas con un cierto ángulo respecto a la horizontal. Debido a que la tubería y el dren son instalados en ángulo, el dren probablemente atravesará múltiples capas geológicas dentro del acuífero costero, extrayendo así agua de diferentes cualidades desde distintas capas/niveles. Este tipo de captación se utiliza con el fin de extender la zona de los drenes del pozo lejos de la ubicación de la cámara de bombas.

Esto permite que el pozo se perfora en la anteplaya, pero que la extracción de agua sea desde un punto fuera de la costa.

El rendimiento de un pozo individual usualmente se encuentra entre los 50 y 150 [L/s] para longitudes superiores a 600 m y diámetros de perforación de hasta 710 mm. Por lo general los pozos inclinados tienen una capacidad en conjunto que llega hasta los 650 [L/s].

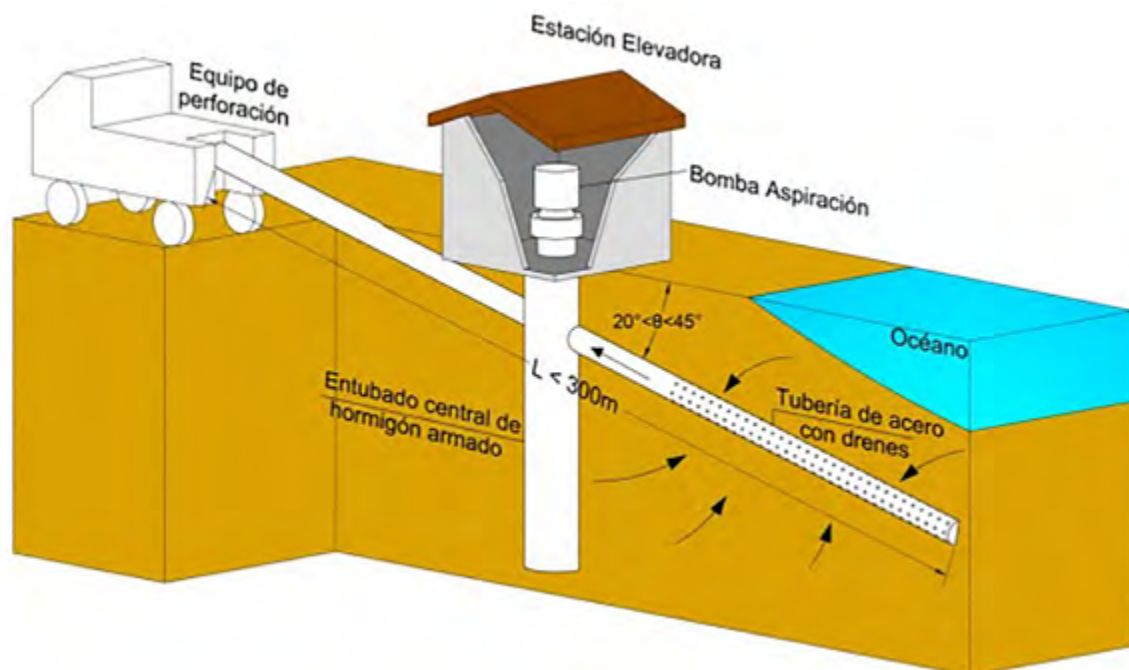


Figura 9. Esquema del sistema de captación mediante pozos inclinados. / Tomado de Repositorio Institucional USM.

5) Pozos con perforación horizontal dirigida (PHD)

Son pozos con una inclinación no lineal. Se extienden desde el punto de entrada, que puede ser lejano a la costa, hasta la antepaya. Su construcción requiere la utilización de un sistema de perforación drill rig. El proceso de construcción consiste en realizar una perforación de pequeño diámetro desde un foso en el cual se introduce un cabezal

de perforación inclinado (con hasta 20°). La localización tridimensional permite controlar en todo momento la situación y la dirección del cabezal, pudiendo incluso salvar obstáculos. Una vez realizado el sondeo piloto se procede al ensanche mediante un retroensanchador del diámetro deseado (hasta 600 mm). Por último, se introduce la tubería, lo que generalmente se hace desde las lejanías de la costa hacia la playa.

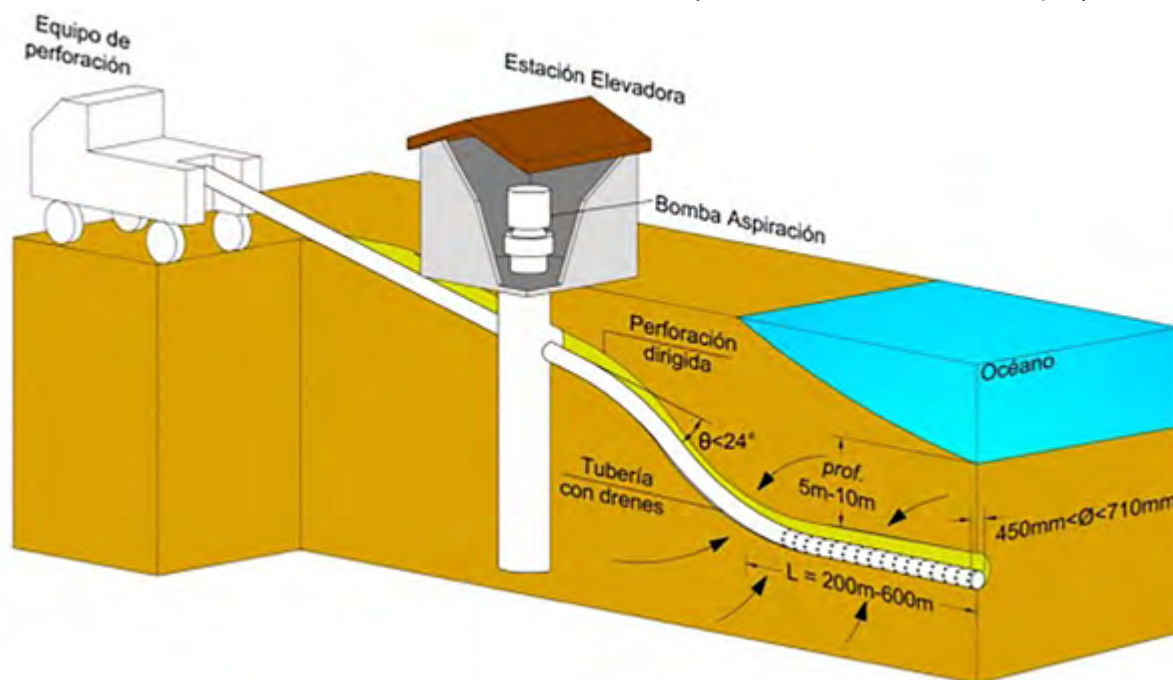


Figura 10. Esquema sistema de captación mediante pozos con perforación horizontal dirigida. / Tomado de Repositorio Institucional USM.

Es necesario cementar un primer tramo, con el fin de captar solamente agua de mar, y el tramo final a lo largo de unos 20 m. Esta técnica es ideal para terrenos consolidados. Los pozos con tecnología PHD se han utilizado con éxito en captaciones que exceden

los 440 [L/s]. Esta capacidad puede disminuir con el tiempo. Se recomienda la implementación de varios pozos inclinados para permitir la rotación de los pozos durante la operación del mantenimiento y restauración del pozo.

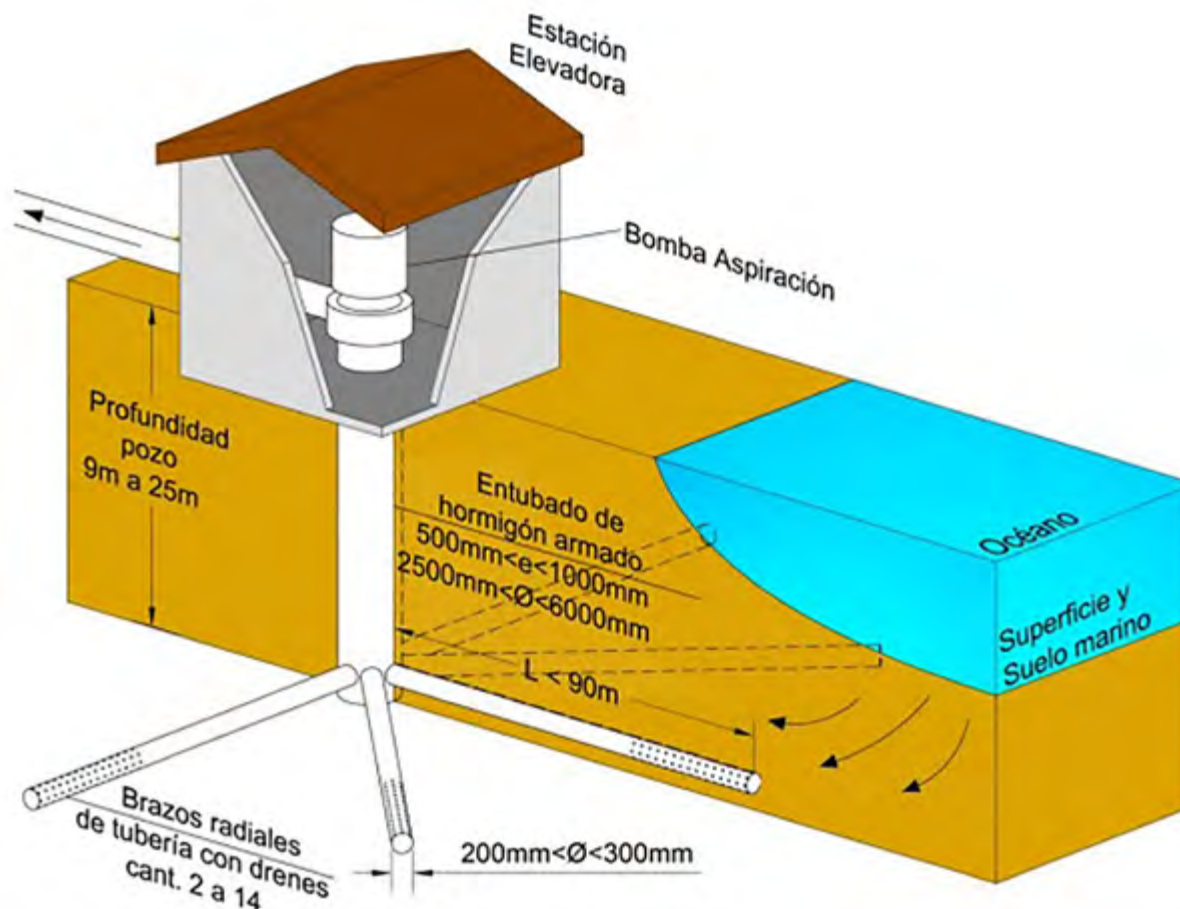


Figura 11. Esquema de captación mediante Pozos radiales horizontales. / Tomado de Repositorio Institucional USM.

6) Pozos horizontales radiales

Generalmente llamados “*Ranney*” debido a su inventor, son una variación de los pozos playeros horizontales, donde múltiples pozos colectores se acoplan con una estación de bombeo instalada encima del entubado central de hormigón armado. El uso de múltiples brazos implica que la producción de cada pozo radial puede ser significativamente mayor que la de un pozo vertical solitario. De requerirse más de un pozo radial, la distancia entre estos debe ser de, al menos, unos 120 m.

Un pozo horizontal radial generalmente es diseñado para captar desde 100 [L/s] de agua

de mar. Dependiendo del número de brazos radiales, la capacidad puede llegar hasta varios cientos de litros por segundo.

7) Galerías de infiltración con cama filtrante

Este tipo de captación consiste en un lecho de filtración de arena sumergida ubicado en la parte inferior de la masa de agua superficial del mar. Se construye excavando el suelo sedimentario no consolidado (conformado por capas de arena, grava, cantos rodados y arcilla) o roca, para luego, instalar una serie de tuberías ranuradas conectadas a un *manifold*. Finalmente, se rellena con un medio poroso para formar un filtro artificial sobre las tuberías ranuradas.

Las excavaciones deben realizarse lejos de la zona de surf y en áreas con suficiente profundidad de agua para proteger la integridad de la estructura. En algunas ocasiones puede ser necesario usar enrocados para proteger a la galería de la erosión.

Generalmente son implementadas cuando las captaciones de pozos no pueden ser utilizadas debido a condiciones hidrológicas desfavorables. Por ejemplo, son adecuados para captaciones donde la permeabilidad

del suelo subterráneo es relativamente baja, o donde el espesor de los sedimentos de la playa es insuficiente para poder instalar una captación de pozo tradicional.

Pueden suministrar grandes cantidades de agua, llegando a ser comparables con las capacidades de las captaciones abiertas. Actualmente, existen plantas con capacidades mayores a 250 [L/s] que utilizan galerías de infiltración. 🌀

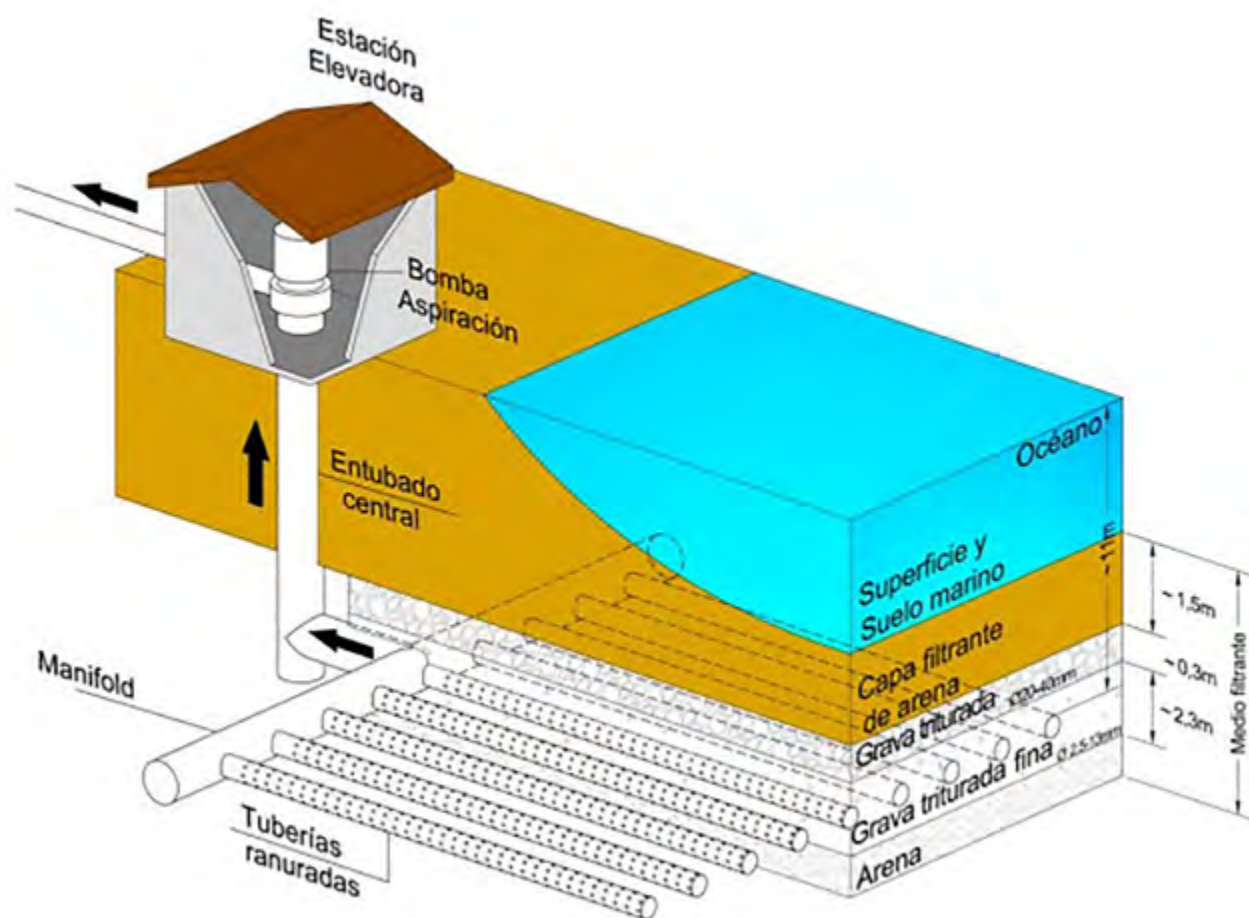


Figura 12. Esquema del sistema de captación mediante pozos inclinados.
/ Tomado de Repositorio Institucional USM.



Figura 13. Planta desalinizadora en Atacama. / Tomado de Structuralia.

Desalinización del agua. Convertir el agua de mar en agua potable .2

Del total de agua dulce de la superficie terrestre, el 87% se encuentra en lagos, el 11% en pantanos y sólo el 2% en ríos. A esto hay que agregar que, aproximadamente, el 80% de las personas en el mundo vive a menos de 100 kilómetros de la costa, por lo que implementar la desalación de agua de mar emerge como una solución apropiada para la escasez de agua dulce actual.

El proceso de separar las sales del agua se llama desalinización y a las aguas continentales con sales disueltas en general se les llama salobres. El nombre de desalación se aplica al proceso de separar las sales del agua, tanto del mar como de las aguas salobres (Tejedor, 2008).

La desalación es el proceso de separación de minerales disueltos (sales) y otras sustancias indeseables contenidas en las aguas salobres o marinas, para convertirlas en agua adecuada para el consumo humano, agua apta para uso industrial o agrícola (Sánchez, 2009).

De acuerdo con Shatat y Riffat (2014) el agua de mar por medio de la desalinización se convierte en agua potable para satisfacer diferentes necesidades tanto domésticas como industriales. En la desalinización, el agua salina se separa en dos partes, una con baja concentración de sales disueltas a la que se llama agua dulce y otra con una concentración mayor que la que se alimente al inicio del proceso.

Para lo anterior, existen soluciones que se basan en las tecnologías de desalinización establecidas desde mediados del siglo XX y son ampliamente desarrolladas en muchas partes del mundo que tienen problemas con la falta de agua.

Los procesos de desalinización para Al-Karaghoulí y Kazmerski (2011) en general se clasifican en dos grandes grupos, uno es el térmico en el que se da cambio de fase y el otro es el de membranas, y en cada uno de ellos se encuentran los diferentes procesos, todos con requerimiento energético para su funcionamiento.

2.1 Datos importantes de los procesos de desalinización

En la tabla 1, se puede observar cómo se evalúa cada uno de los procesos de acuerdo a la temperatura de operación, el tipo de energía, su consumo de energía y la calidad de agua que producen. Los procesos de

ósmosis inversa y electrodiálisis presentan una calidad del agua menor (<500 ppm) con respecto a los demás (<10 ppm), pero son las que tiene el menor consumo de energía.

	MSF	MED	MED-TVC	MVC	RO	ED
Temperatura de operación (°C)	< 120	< 70	< 70	< 70/1/	< 45	< 45
Tipo de energía	Vapor (calor)	Vapor (calor)	Vapor	Mecánica (energía eléctrica)	Mecánica (energía eléctrica)	Energía eléctrica
Consumo de energía térmica (kWh/m³)	12	6	21	No aplicable	No aplicable	No aplicable
Consumo de energía eléctrica (kWh/m³)	3,5	1,5	1,5	8 - 14	4 - 7	1,0
Contenido de sales (ppmTDS)	30000 - 100000	30000 - 100000	30000 - 100000	30000 - 50000	1000 - 45000	100 - 3000
Calidad del agua producida (ppm TDS)	< 10	< 10	< 10	< 10	< 500	< 500
Capacidad típica (m³/d)	5000 - 60000	500 - 12000	100 - 20000	10 - 2500	1 - 10000	1 - 12000

Tabla 1. Datos importantes de los procesos de desalinización.

2.2 Procesos térmicos

De acuerdo con Al-Karaghoul y Kazmerski (2011) este tipo de procesos son similares al ciclo natural que tiene el agua, cuando el agua de mar se somete a calor produciendo el vapor de agua, el cual se condensa para obtener el agua dulce. Los más empleados son: Destilación flash de varias etapas (MSF), Destilación de múltiples efectos (MED) y

Evaporación por compresión de vapor (VC); estos dos últimos están ampliando su rol en la desalinización pues el MSF es uno de los más utilizados mundialmente. Estas tecnologías desalinizadoras necesitan de energía ya sea térmica o mecánica para lograr la evaporación del agua.

1) Destilación flash de varias etapas

Shatat y Riffat (2014), mencionan que por medio de este proceso actualmente se produce cerca del 64% de la producción total de agua desalinizada en el mundo. El agua que se alimenta es calentada en un calentador de salmuera hasta una temperatura menor a

la de ebullición, el agua caliente pasa por una serie de recipientes donde la baja presión hace que el agua hierva y se evapore, este vapor se convierte en agua dulce por medio de un condensador; normalmente una planta MSF tiene entre 15 y 25 etapas.

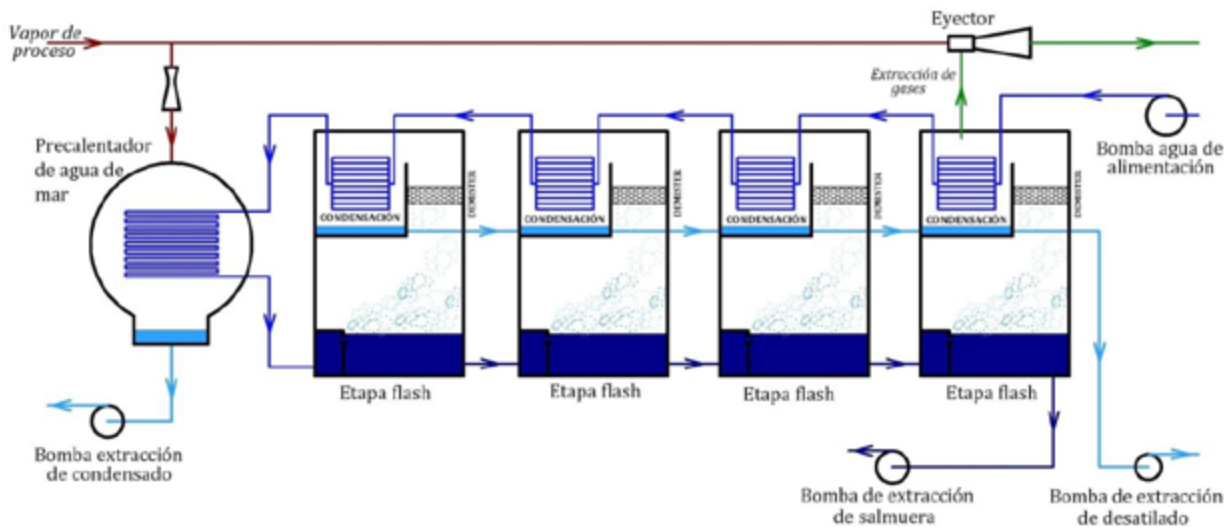


Figura 14. Esquema de un sistema MSF convencional. / Tomado de Ptolomeo, UNAM-México.

2) Destilación de múltiples efectos (MED)

Para Al-Karaghoulí y Kazmerski (2011), es el método más antiguo de destilación para la desalinización de agua de mar. De toda el agua desalada en el mundo, el 3,5% es producida por plantas de destilación de múltiples efectos. Este método tiene menor consumo de energía que los MSF. Su funcionamiento se basa en el principio

de reducción de la presión en cada etapa. Según Shatat y Riffat (2014) el agua de mar es alimentada y se lleva a punto de ebullición después de que es precalentada en tubos, para promover la evaporación se rocía sobre los tubos de evaporador, el agua evaporada sale con un bajo porcentaje de sal y pasa a la siguiente etapa, el vapor se condensa del otro lado como agua dulce.

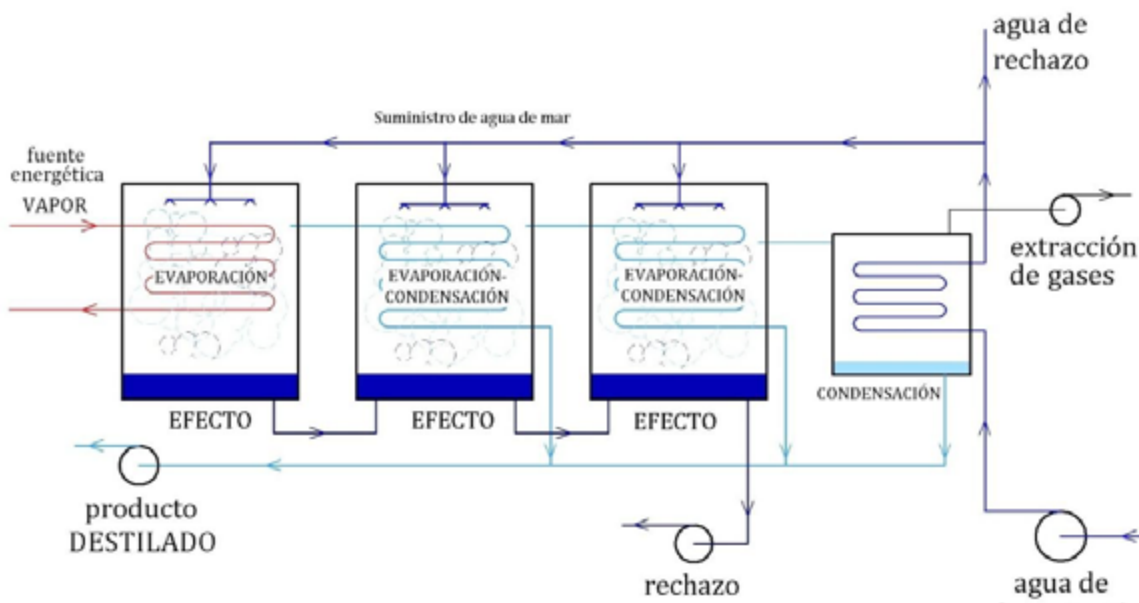
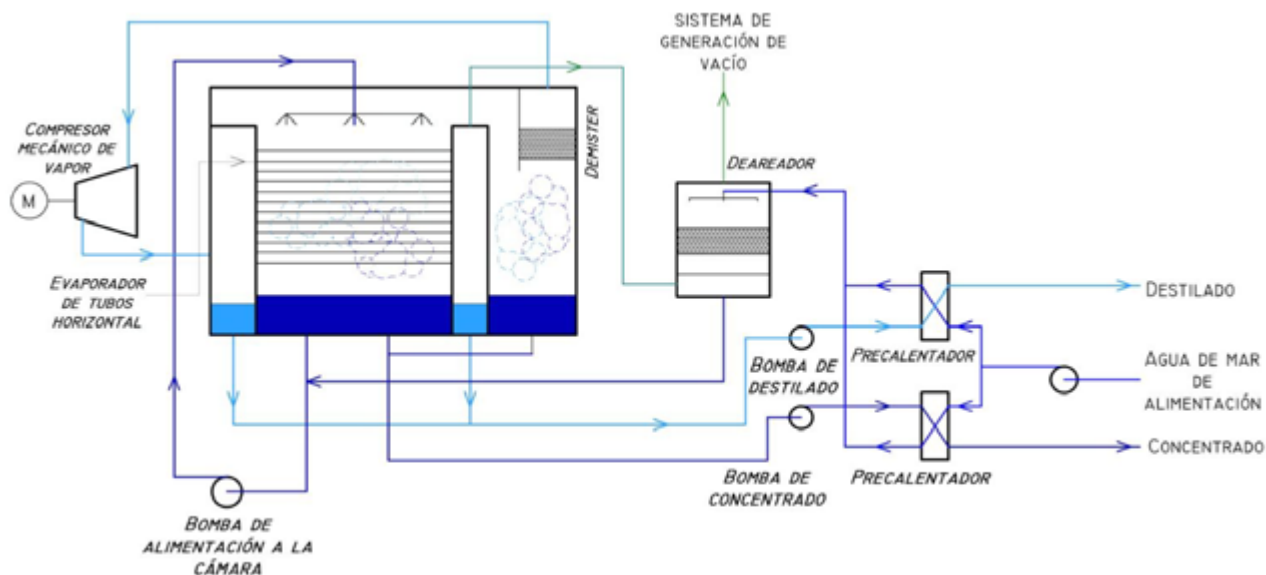


Figura 15. Esquema de proceso MED convencional. / Tomado de Ptolomeo, UNAM-México.

3) Evaporación por compresión de vapor (VC)

De acuerdo con Shatat y Riffat (2014), para lograr la evaporación del agua de mar en este caso el calor proviene de la compresión de vapor, se puede utilizar algunos de estos dos dispositivos, ya sea un compresor mecánico (MVC) o de vapor térmico (TVC), los cuales condensan el vapor de agua y producen el calor necesario para evaporar el agua que se alimenta a la planta. Al-Karaghoulí y

Kazmerski (2011) menciona que en el método del compresor mecánico la mayoría de veces se acciona eléctricamente, mientras que en el compresor térmico un orificio tipo Venturi crea y extrae vapor de agua obteniendo una presión más baja en el depósito del agua; generalmente los MVC se construyen de diferentes tamaños de hasta alrededor de los 3000 m³/día y los TVC pueden llegar hasta los 20000 m³/día etapa.



*Figura 16. Sistema de desalación por Compresión Mecánica de Vapor convencional.
/ Tomado de Ptolomeo, UNAM-México.*

2.3 Procesos de membrana

Como indica Al-Karaghoulí y Kazmerski (2011), en los procesos de membrana y de filtros se permite o detiene de manera selectiva el paso de ciertos iones, de acuerdo a estas capacidades se han diseñado los procesos de desalinización.

Según Shatat y Riffat (2014) se emplea una membrana parcialmente permeable con el fin de mover el agua o sal, creando zonas de diferente concentración, produciendo así el agua dulce; la diferencia entre los diferentes tipos de procesos dependerá del tamaño de los iones, moléculas y partículas que se puedan retener o dejar pasar; algunos de los procesos son: la electrodiálisis (ED), ósmosis inversa (RO), destilación de membrana,

nanofiltración, ultrafiltración, microfiltración y la filtración utilizadas para previos tratamientos al de la desalinización; aunque Al-Karaghoulí y Kazmerski (2011) agregan que comercialmente los más importantes son la ED y RO los cuales representan más del 50% de los procesos utilizados en la desalinización.

1) Electrodiálisis (ED)

Para Shatat y Riffat (2014) la ED es uno de los procesos para la desalinización del agua de mar, con muchas aplicaciones tanto en la industria ambiental como bioquímica, además de ser usada para producir sal de mesa. Para este proceso se utilizan membranas de intercambio iónico las

cuales son cargadas eléctricamente con una diferencia de potencial eléctrico, la separación depende de que las sales disueltas en el agua de mar son iónicas, es decir cargadas ya sea positiva o negativamente, las cuales migran a los electrodos que posean su carga opuesta. Dévora, González y Ruiz (2018) agregan que

el consumo de energía que presenta es proporcional a la cantidad de sales que son eliminadas del agua, de acuerdo con esto, Al-Karaghoulí y Kazmerski (2011) indican que no es económicamente llamativa para desalinizar agua de mar.

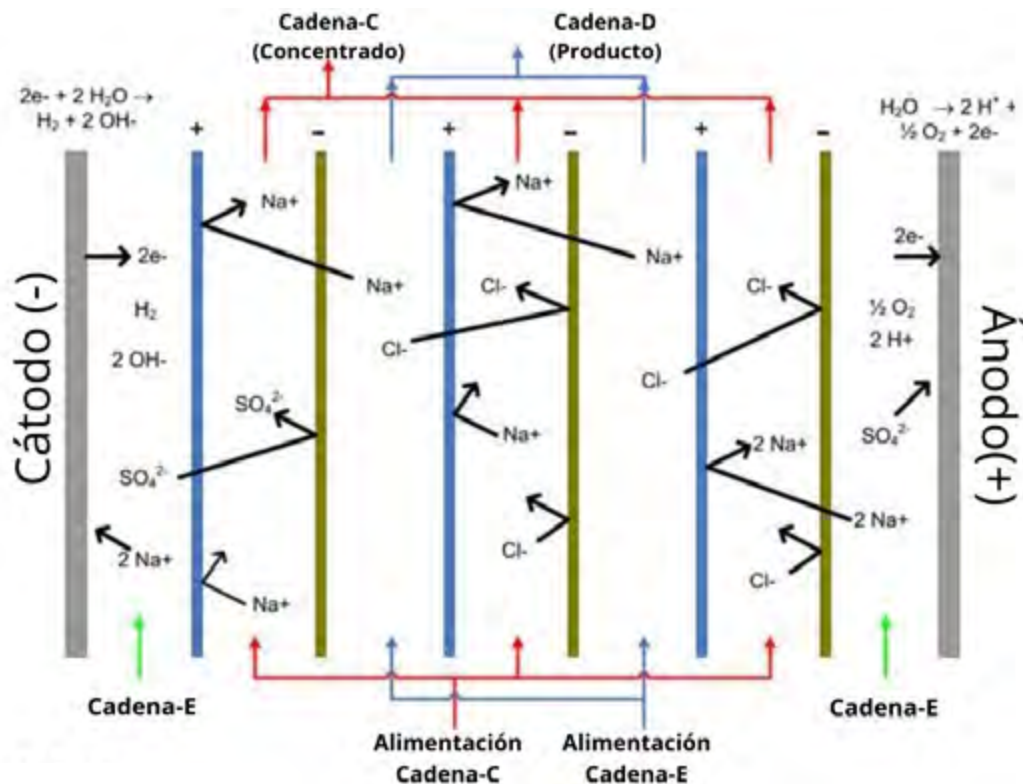


Figura 17. Movimiento de los iones en un proceso de electrodiálisis. / Tomado de Lifeder.

2) Ósmosis inversa (RO)

De acuerdo con Shatat y Riffat (2014), las membranas de RO permiten separar sales, moléculas orgánicas e inorgánicas por medio de un gradiente de presión en donde se fuerza al disolvente a pasar a través de la membrana de una zona de mayor concentración a una de baja concentración. Para Al-Karaghoulí y Kazmerski (2011), en la desalinización por medio del sistema de RO se tienen en cuenta cuatro subsistemas: el pretratamiento, bomba de alta presión, el sistema como tal de RO y un post tratamiento.

El pretratamiento, según Al-Karaghoulí y Kazmerski (2011) es de gran importancia en el sistema de RO ya que las membranas son sensibles a incrustaciones, normalmente se utilizan procesos de esterilización, filtración

y añadidura de productos químicos, por otro lado la bomba de alta presión permite que el agua proveniente del pretratamiento fluya por la membrana con un rango de presión de entre 55 y 82 bares. La membrana es semipermeable, siendo altamente permeable al agua, pero impenetrable por la sal, para su fabricación se emplean acetatos de celulosa o polímeros de poliamida y por último el postratamiento se basa en esterilización, estabilización y enriquecimiento del agua potable.

Para Dévora, González y Ruiz (2018) el proceso de RO es uno de los más sencillos para desalar con los mejores rendimientos, una planta de RO no es muy grande ya que el arreglo de las membranas puede ser en paralelo o en serie. Se realiza la captación de agua a la que

se lleva a un pretratamiento físico y químico, luego pasa por las membranas para eliminar la sal y por último pasa a un postratamiento. Además, Al-Karaghoulí y Kazmerski (2011) mencionan que gracias a que el sistema de

RO funciona a temperatura ambiente se disminuyen los problemas de corrosión e incrustación. 

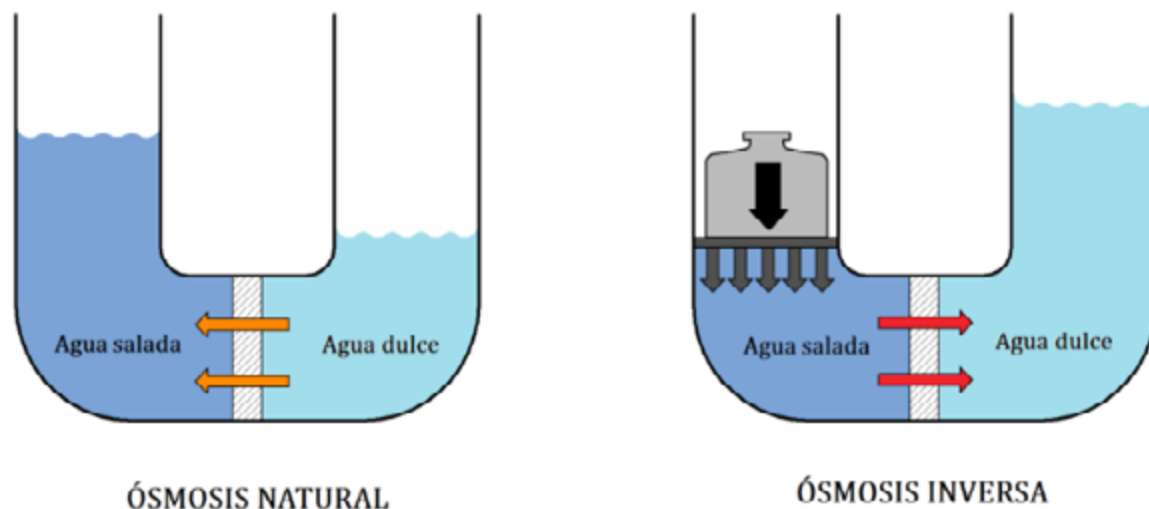


Figura 18. Esquematización del proceso natural de ósmosis y ósmosis inversa.

/ Tomado de Ptolomeo, UNAM-México.

Desalación del agua por ósmosis inversa (RO) .3

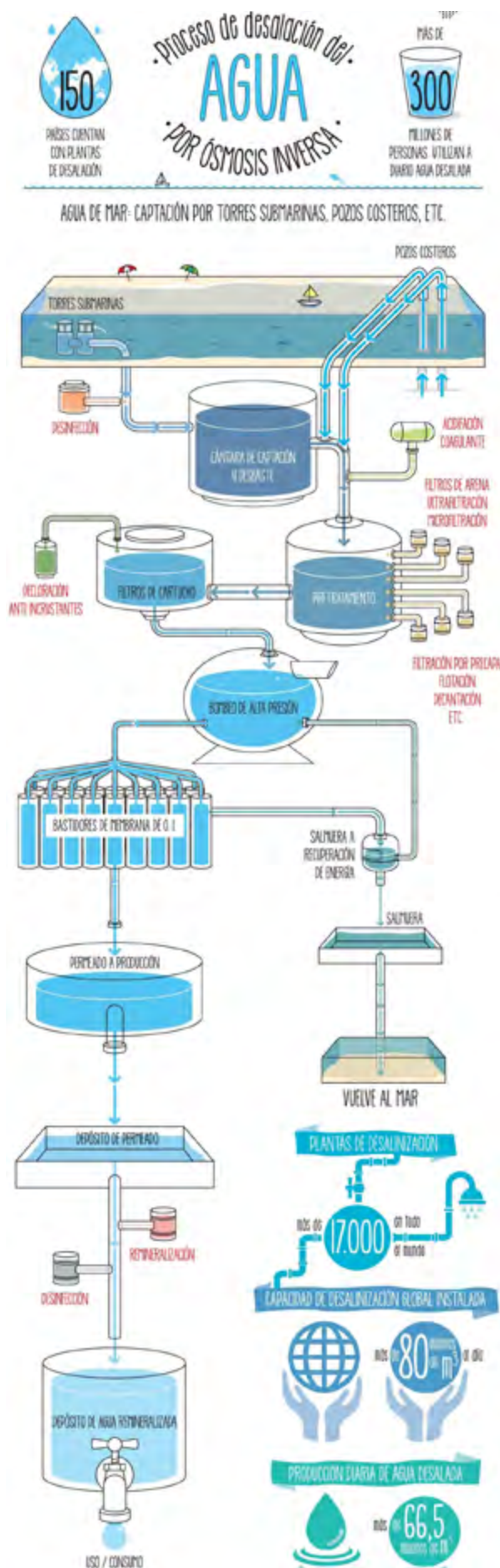


Figura 19. Proceso de desalación del agua por ósmosis inversa. / Tomado de iAgua.

Actualmente la RO es el proceso de desalación más utilizado en el mundo para desalar agua, ya sea esta marina o salobre. La infografía muestra cómo funciona el proceso, desde que el agua salada es captada en el mar hasta que se obtiene agua dulce potable lista para el uso y el consumo.

De esta forma, aplicando energía en forma de presión sobre una disolución con mayor concentración de sales para forzar su paso a través de una membrana semipermeable, es posible obtener al otro lado de la membrana una disolución con baja concentración salina.

Las membranas semipermeables utilizadas en la desalación por RO desempeñan un papel clave, alrededor del cual gira todo el proceso de una planta desaladora. Las primeras membranas que se utilizaron a nivel comercial estaban fabricadas con acetato de celulosa. Actualmente las más empleadas son las de poliamida que permiten controlar mejor el tamaño del poro y la permeabilidad.

La forma de las membranas también ha evolucionado tecnológicamente. Las primeras que se utilizaba eran planas, posteriormente de fibra hueca y actualmente las que más se utilizan son las de enrollamiento en espiral, que están formadas por varias láminas de membranas rectangulares enrolladas alrededor de un eje.

La introducción de la RO para la desalación de agua supuso una importante reducción de costes de inversión, construcción y explotación de una planta desaladora, y, por tanto, del precio de agua desalada, lo que ha permitido el desarrollo de la desalación para la obtención de agua de gran calidad en cada vez más rincones del planeta.

La RO se utiliza para la desalación de agua que pueden tener distintos usos posteriores.

Además de, como agua potable y para abastecimiento, que es el más extendido, sus usos pueden ser industriales o para riego agrícola.

En el ámbito industrial, numerosas industrias, como por ejemplo la alimentaria, farmacéutica, médica, cosmética, química, electrónica, precisan agua de gran calidad. Los avances tecnológicos en este ámbito han permitido que la RO pueda ofrecer un agua prácticamente a la carta para sus necesidades específicas. También es habitual el uso de la RO para el tratamiento de aguas residuales, tanto de origen municipal

como industrial, logrando gracias a este proceso, la depuración y la reutilización posterior de esas aguas.

La salmuera que se devuelve al mar no tiene un impacto ambiental negativo para el entorno, ya que se hace bajo estrictas condiciones medioambientales y los posibles problemas se minimizan. Se evitan concentraciones de sal nocivas para el ecosistema a través de emisarios submarinos o diluyendo la salmuera con agua de mar en unos depósitos antes de devolverlo al mar. 



Figura 20. Planta desaladora de agua de mar por ósmosis inversa. / Tomado de AEDyR.

Aplicaciones en industrias de la ósmosis inversa .4

El uso de la RO para la obtención de agua para uso industrial de gran calidad es cada vez más habitual en gran cantidad de industrias y procesos industriales. Este proceso de tratamiento del agua se utiliza principalmente para la desmineralización de las aguas, obteniendo agua de gran pureza, aunque sus usos son muy diversos.

Como se planteó anteriormente, la RO es la principal técnica de desalación de agua, aunque también se utiliza para la obtención de aguas industriales. Es importante resaltar

que el uso del tratamiento por RO en la industria, varía enormemente, no sólo entre industrias y empresas de distintos sectores, sino también entre secciones de una misma empresa.

Conocer las necesidades de cada sector y empresa resulta imprescindible para lograr adaptar el tratamiento de agua a cada proceso industrial, de tal manera que se pueda, además, optimizar el uso de los recursos hídricos, de la producción y minimizar su impacto medioambiental.

4.1 ¿Qué industrias utilizan agua tratada con ósmosis inversa?

- **Industria farmacéutica**

Para la creación de productos farmacéuticos se necesita el uso de agua muy pura, libre de partículas disueltas, bacterias y restos orgánicos. No es raro encontrar que algunos productos farmacéuticos requieran que los niveles de sales disueltas sean hasta

10.000 veces inferiores a los del agua potable. Además, dentro de esta industria, se debe proveer agua que cumpla con las estrictas normas para la correcta fabricación de medicamentos para uso humano y veterinario existentes, algo que la RO, junto a otros tratamientos de agua, hacen posible.



*Figura 21. Generación, distribución y almacenamiento de agua PW, WFI, y PS Diálisis.
/ Tomado de Rosemblak Scientifica.*

- **Industria sanitaria**

Una vez más el agua de gran calidad se convierte en una materia prima imprescindible en este ámbito que abarca desde técnicas de laboratorio e instrumentos de análisis, hasta biotecnología o incluso de proceso con humidificadores o cabinas de aire acondicionado. También se utiliza agua de gran calidad para la esterilización y desinfección termal de instrumental sanitario y de equipos médicos como por ejemplo los endoscopios. Las soluciones de tratamiento para conseguir esta agua ultra pura son también de vital importancia en las unidades de hemodiálisis donde la calidad del agua necesaria para el tratamiento de los pacientes debe cumplir con estrictas condiciones de baja conductividad y ser totalmente apirógena.

- **Industria química**

El agua es una importante materia prima en este sector industrial tan variado, ya que abarca desde la química básica y las especialidades, hasta la industria petroquímica en la que se incluye la manufactura de disolventes, pinturas, plásticos, pesticidas y productos agroquímicos, fibras sintéticas, resinas, etcétera.

- **Industria cosmética**

El ciclo de tratamiento del agua está sujeto en esta industria también a estándares muy estrictos y, además del agua de proceso, se debe cuidar enormemente del agua de los efluentes producidos. En ambos ámbitos se aplica con frecuencia la tecnología de RO.

- **Industria electrónica**

El agua es de vital importancia en el proceso de manufacturado de esta industria, utilizándose principalmente en el aclarado en varias fases del proceso de producción. Existen además unos requisitos muy estrictos sobre la calidad del agua utilizada en esta industria en constante crecimiento y evolución, debido a los constantes avances tecnológicos, que requieren de tratamientos como la RO para obtener el agua ultra pura que necesitan. También existe una normativa medioambiental estricta para la descarga de los efluentes utilizados en estos procesos industriales, donde una vez más es habitual recurrir a procesos de membranas.

- **Industria alimenticia y de bebidas**

El agua es primordial en esta industria ya que es parte integral del proceso de producción, además de ser con frecuencia componente del producto, y por tanto materia prima. Además, se utiliza también el agua de gran pureza para la refrigeración, producción de vapor y labores de limpieza. Una vez más, la calidad del agua resulta básica para prevenir problemas de salud y mantener la calidad en los distintos procesos de la producción de alimentos y bebidas, en los que la tecnología de RO es una garantía para lograrlo.

- **Producción de energía eléctrica**

Uno de los usos más frecuentes de la RO en el ámbito industrial es en las plantas de energía eléctrica. Las plantas de producción de energía eléctrica que utilizan carbón, gas, petróleo, así como las plantas nucleares, necesitan también grandes cantidades de agua, ya que usan vapor de agua para hacer girar las turbinas que generan la electricidad. Las impurezas en el vapor causan problemas y reducen la electricidad producida, aumentando a su vez el combustible consumido para producir una determinada cantidad de electricidad, por lo que es imprescindible el agua purificada obtenida con el tratamiento de RO.

- **Industria metalúrgica**

La RO se utiliza frecuentemente en la industria metalúrgica, ya que las superficies necesitan eliminar todas las impurezas para ser soldadas y lacadas. También se utiliza agua de alta calidad para las soluciones de recubrimiento y sellado, así como, para el lavado y enjuagado.

- **Industria óptica**

Muchos tratamientos de la industria óptica, como la producción de cristales antirreflejos o cristales satinados, requieren el uso de agua de gran calidad obtenida por RO.



Figura 22. Ósmosis inversa para la industria alimentaria. / Tomado de SETA PHT.



Figura 23. Planta desalinizadora contenerizada para riego de aguacate en Chile. / Tomado de Agritechmurcia.

- **Artes gráficas e imprenta**

La impresión offset requiere de un agua de gran pureza para lograr mejores resultados, así como para el mantenimiento de este tipo de impresoras, que, debido a la acumulación de sales o impurezas del agua, pueden sufrir daños si no se trabaja con un agua de alta calidad.

- **Alimentación de calderas**

Es habitual que en las plantas industriales que utilizan vapor para accionar las turbinas, el agua se purifique antes de someterse al proceso de evaporación, ya que de no ser así podría dañar la turbina, obligando a detenerlas para llevar a cabo operaciones de mantenimiento, por lo que la solución de purificación de agua a través de la RO es imprescindible.

- **Ganadería**

La RO también puede usarse para adecuar el agua que bebe el ganado en aquellos casos en los que el agua del lugar tenga un elevado contenido de sales y, por lo tanto, sea nociva para el correcto desarrollo de los animales.

- **Agricultura**

Aunque el agua de riego no tiene por qué tener una calidad tan elevada como el agua potable, cuando las fuentes de agua tienen una mala calidad o una salinidad demasiado alta, con frecuencia es necesario el tratamiento del agua con RO antes de poder ser utilizada para riego. Además, en producciones agrarias de alto valor añadido, la calidad del agua utilizada para riego, en la que puede obtenerse un agua con una composición muy específica, puede potenciar una mejor y mayor producción agrícola. 



Figura 24. Tecnologías para la desionización capacitiva. / Tomado de Agua y Sistemas.

Una tecnología que multiplica la eficiencia de las plantas desalinizadoras: desionización capacitiva .5

Conseguir más agua dulce con menos energía es el objetivo de nuevos procesos como la desionización capacitiva (CDI), una tecnología que registra avances considerables.

La CDI, constituye un novedoso sistema aún en desarrollo que, además de eliminar la sal del agua, permite almacenar energía. Funciona por medio de unos electrodos (ánodos y cátodos) que atraen los iones de sal al aplicarles una corriente eléctrica. A su vez, al interrumpir la corriente en la llamada fase de regeneración, los iones se liberan y generan electricidad. El principal obstáculo reside en desarrollar los condensadores electroquímicos necesarios, ya que existen problemas de oxidación en esa segunda fase. Además, en estos momentos solo sirve para eliminar concentraciones de sal pequeñas, ya que, al aplicar corrientes eléctricas mayores de 1,2 V, se incrementa exponencialmente la corrosión de los electrodos cada vez que se liberan los iones. Diversos laboratorios están trabajando en esta prometedora tecnología de desalinización del agua que, teóricamente, requeriría un gasto energético entre cinco y seis veces menor a la RO.

Una de las últimas novedades en este terreno proviene de las investigaciones de un equipo de científicos de la Universidad de Pensilvania que han creado un sistema de desalinización del agua llamado desionización de electrodos de baterías (*battery electrode deionization - BDI*). Su solución pasa por la creación de una célula con dos electrodos en los extremos y dos canales separados por una membrana. Los científicos han hecho circular dos soluciones (una salina y otra de agua dulce), aplicando una corriente continua. La primera ventaja es que se obtienen los mismos resultados con la mitad de voltaje (0,6v). Basta con cambiar la dirección de la corriente (+0,6v o -0,6v) en lugar de interrumpirla y producir agua desalada y concentrada en ambos compartimentos simultáneamente para poder prescindir de la fase de regeneración. Y, además, apilando membranas adicionales entre los electrodos se podría reducir todavía más dicho consumo de energía.

Por el momento, es una tecnología que solo opera fiablemente en presencia de concentraciones salinas reducidas, aunque sus impulsores se muestran optimistas con respecto a las aplicaciones futuras, una vez que la tecnología esté más madura. 



Figura 25. Sistemas de captación en desaladoras de agua de mar. / Tomado de iAgua.

6. Sistemas de captación en desaladoras de agua de mar

La desalación de agua de mar ha adquirido en los últimos años un importante auge debido principalmente a la mejora de las tecnologías en RO y de los sistemas de recuperación de energía. Los sistemas de captación también han ido cambiando y mejorando con el transcurso de los años debido principalmente a la necesidad de adaptación a las nuevas normativas ambientales, mejoras tecnológicas y el aumento de calidad y eficiencia de las nuevas plantas. Tanto las tomas como los vertidos de las plantas son puntos con una elevada carga ambiental pues se desarrollan generalmente próximos a ecosistemas marinos, a menudo con alto grado de protección.

Actualmente los principales sistemas de captación de agua marina para desalación pueden clasificarse en:

- Tomas abiertas.
- Pozos/Sondeos verticales.
- Drenes horizontales.
- Tomas mixtas.

En relación con el aspecto cualitativo, la toma abierta genera más incertidumbres, ya que es más vulnerable a todo tipo de vertidos

contaminantes, presenta mayor variabilidad de calidad, y está sujeta a variaciones de temperatura. Por el contrario, el agua de pozos y drenes presenta generalmente una mejor calidad y es más homogénea.

Ahora bien, desde el punto de vista de la garantía de caudal, las ventajas son para las tomas abiertas, ya que la experiencia demuestra la dificultad de asegurar el caudal de producción en el agua de pozos y drenes por lo que, para plantas de producción media/alta, se aconseja en condiciones normales la toma abierta de agua de mar, aunque presente el inconveniente de una mayor complejidad de ejecución y, en muchos casos, mayor inversión en la etapa de pretratamiento.

Una vez captado el agua necesaria puede enviarse directamente a la planta o a un depósito de bombeo intermedio, en el caso de tomas sin presión. La presión de entrada a la planta generalmente oscila entre los 2 y 6 bares, antes del pretratamiento. Los bombeos intermedios antes de la entrada a la planta pueden ser en cámara seca o mediante bombas sumergibles.



Figura 26. Introducción de la tubería de la toma en el mar. / Tomado de iAgua.

6.1 Tomas abiertas

Generalmente este tipo de captaciones se utiliza en plantas de gran capacidad, o en aquellas donde una vez realizados los estudios hidrogeológicos no es posible conseguir el caudal necesario mediante la ejecución de pozos o drenes.

Las ventajas de este tipo de tomas son las siguientes:

- Caudal asegurado incluso para posibles ampliaciones.
- Bajo mantenimiento, pues normalmente sólo se requiere una inspección y limpieza de las rejillas anualmente, respecto, por ejemplo, en tomas de pozos en las que el mantenimiento es continuo.

Y como principales inconvenientes:

- Es necesaria la ejecución de obras marinas, que normalmente por su dificultad incrementan el presupuesto de las obras.
- Mayores condicionantes ambientales.
- Al realizarse la toma directa la calidad del agua es menor, al no disponer de una filtración natural del terreno como la que se obtiene al captar el agua mediante pozos o drenes. La calidad del agua a la entrada puede sufrir variaciones importantes,

debido principalmente a las fluctuaciones por temporales, posibles vertidos próximos, etcétera.

- Se produce también un incremento en la inversión del pretratamiento siendo necesario colocar un mayor número de filtros de arena, incluso dependiendo de la calidad puede ser necesaria la instalación de una doble etapa, e instalaciones previas de desarenado o eliminación de sólidos por flotación.
- También es necesario modificar ligeramente el pretratamiento e introducir en este la dosificación de coagulantes, y aumentar las dosificaciones de anti incrustante e hipoclorito sódico.

Sin embargo, estas desventajas pasan a un segundo plano cuando no existe otra manera de conseguir el caudal necesario para la alimentación de la planta.

Las tomas abiertas generalmente constan de los siguientes elementos:

- 1) Torre de toma de agua de mar.
- 2) Inmisario submarino de captación.
- 3) Cántara o pozo de bombeo a planta.



Figura 27. Participación de los buzos en el proceso de instalación de tomas de agua. / Tomado de iAgua.

Para evaluar la ubicación más idónea y obtener la mejor calidad de agua posible se toman muestras a diferentes profundidades y en diferentes condiciones para conocer al menos los siguientes parámetros físico-químicos:

- PH, materias en suspensión (MES), turbidez, oxígeno disuelto, nutrientes inorgánicos (Amonio (NH_4), Nitratos (NO_3), Nitritos (NO_2), Ortofosfatos (P_2O_5)), Demanda Biológica de Oxígeno DBO_5 , Pigmentos Fitoplanctónicos (clorofila).
- Metales, metaloides y no metales: Cobre, Cromo, Hierro, Manganeso, Zinc, Aluminio, Boro, Silicio, Selenio.
- Carbono Orgánico Total (TOC).
- Sólidos disueltos: Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Bario, Estroncio, Cloruros, Sulfatos, Bicarbonatos, Carbonatos, Fluoruros, Silicatos, Bromuros.
- Hidrocarburos totales y aceites y grasas.
- Microbiología: Escherichia coli, Coliformes totales, Streptococos fecales, Bacterias marinas a 22 °C.

Una vez analizada la calidad del agua y analizados los condicionantes ambientales,

será necesario el estudio de la geología y geotecnia de las obras marinas con el fin de comprobar la idoneidad del terreno para la instalación de la toma de agua, la conducción y el bombeo en tierra. Generalmente se realizarán sondeos, ensayos de penetración (SPT) o tomografía eléctrica, para conocer la capacidad portante y las características del terreno y adoptar los métodos más convenientes para la ejecución de las obras.

Es necesario realizar un estudio de la dinámica litoral en toda la zona de actuación mediante modelado numérico, en el que se estudiarán los diferentes elementos forzadores de la dinámica marina, oleaje, direcciones del viento, etc. De este estudio se obtienen las condiciones tanto medias como extremas del oleaje asociada a un periodo de retorno que permiten determinar las acciones de diseño en profundidades indefinidas y conocer también las alteraciones que sufre el oleaje en su aproximación a la costa.

Los principales elementos de los que generalmente consta un sistema de captación mediante toma abierta se muestran a continuación.

1) Torre o cajón de Toma

La torre o cajón de toma puede ejecutarse con diferentes materiales: polietileno, poliéster, hormigón. Su construcción se ejecuta en dique seco y posteriormente se transporta a su ubicación mediante remolcador.

Básicamente la torre de toma debe contar con unas ventanas para la captación del agua, protegidas con rejillas de poliéster, polietileno o acero inoxidable, para evitar la entrada de grandes peces y sólidos, de una brida o elemento de conexión con el inmisario y una boca de hombre, generalmente ubicada en su parte superior para las labores de mantenimiento e inspección interior.

Las ventanas se ubican en la parte superior de los laterales para evitar la entrada de arenas, y la conexión con el inmisario se realiza a una cota superior a la de la solera a fin de que los sólidos y sedimentos que puedan introducirse en su interior debido al arrastre de la dinámica litoral decanten y no pasen al interior de la tubería. Si el flujo de entrada de agua en las estructuras es horizontal, se reduce enormemente la succión de organismos, respecto de la entrada en

dirección vertical descendente. Se estudian modelos hidrodinámicos para evitar la posible succión de material, con velocidades que garanticen que no se producirá entrada de sedimentos y que no habrá acumulaciones de material alrededor de la torre que puedan alcanzar las ventanas.

La forma de las ventanas de toma suele ser rectangular o circular, esta última ofrece la ventaja de su facilidad de cierre con bridas ciegas para su transporte e instalación y conseguir de esta manera la máxima estanqueidad. Para la determinación de las dimensiones y el número de ventanas se tendrá en cuenta el caudal máximo de paso incluyendo las posibles ampliaciones, las pérdidas de carga por el paso del hueco y la pérdida de sección de las rejillas con el porcentaje de atascamiento previsto.

La profundidad de instalación depende en gran medida de la calidad del agua a captar, de los condicionantes medioambientales, de los condicionantes geotécnicos y de clima marítimo y por la optimización de costes, ya que a mayor profundidad y separación de la costa estos son más elevados.



Figura 28. Construcción y traslado de cajón de toma de hormigón. / Tomado de iAgua.



Figura 29. Cajón de toma flotando durante el remolque. / Tomado de iAgua.

La estructura, no debe suponer un obstáculo significativo para la dinámica general de transporte de sedimentos en la zona, y debe calcularse para soportar los esfuerzos transmitidos por la dinámica litoral y las presiones debidas a la profundidad y la carga de agua. También estará previsto en el proyecto el sistema de fondeo y los cálculos de flotabilidad y transporte en caso de ser necesario su remolcado hasta su ubicación definitiva. Debe realizarse un estudio detallado para garantizar la estabilidad de la estructura ante vuelco, deslizamiento y hundimiento, condicionando la geometría y el peso de la estructura. A la estructura se le suele dar un tratamiento con pinturas antifouling, adiciones de hipoclorito y aire comprimido, para evitar incrustaciones. La adicción de hipoclorito, generalmente en impulsos, mantendrá la entrada limpia y evitará incrustaciones en la estructura y en la tubería.

Para su transporte y fondeo puede utilizarse un flotador fijo construido junto a la toma con las dimensiones necesarias para garantizar su flotabilidad o bien flotadores hinchables que suspenderán la estructura para su remolcado hasta el punto de fondeo. En el

caso de cajones auto flotantes, por seguridad, en caso de llenado accidental, estarán previstos los flotadores necesarios para evitar su hundimiento.

Fases para su ejecución:

Dependiendo del terreno existente en la ubicación será necesario ejecutar una banqueta de apoyo, mediante dragado o nivelado del fondo con grava, una vez colocada la torre en la banqueta suele protegerse con un relleno de hormigón sumergido y/o escollera.

El dragado puede efectuarse mediante succión si se trata de arenas o excavación mediante bivalva desde gánguil para terrenos más consolidados. En caso de tener terrenos de mayor dureza y de dificultad de excavación pueden efectuarse microvoladuras controladas para fracturar la roca y facilitar su posterior excavación.

La construcción de la torre se realizará en un puerto con calado suficiente para su transporte. La unión entre estructuras en caso de construirse con un flotador fijo se realizará con tornillería de acero inoxidable y resinas para garantizar la estanqueidad, el flotador si es metálico se revestirá con resina de poliéster

para evitar su corrosión, que puede pasar al interior de la toma y acabar incrustándose en las membranas de ósmosis inversa (RO).

El flotador llevará incorporado dos tuberías, una para la entrada de agua para lastrarlo y otra para la salida de aire a medida que éste se llena de agua (acción a desarrollar en la última fase constructiva). También se incorporarán varias orejetas por la parte posterior del cajón de modo que se puedan pasar por detrás del mismo los elementos adecuados para su remolque. En la parte superior del cajón se colocarán los elementos de anclaje necesarios para su izado y puesta a flote. Una vez finalizada la primera fase, el cajón será puesto en flotación desde el muelle mediante grúa o si es necesario, debido al peso, se utilizarán varias grúas.

Durante la fase de cálculo será necesario comprobar la estabilidad en flotación y el calado necesario para su transporte con resguardo de seguridad para su remolque. El transporte de la torre se llevará a cabo mediante remolcador a velocidad no superior a dos nudos hasta la ubicación seleccionada en condiciones meteorológicas y de oleaje favorable.

Mediante lastrado progresivo con agua de mar se irá hundiendo el cajón en el emplazamiento definitivo previsto para la toma. El flotador se diseña para que, en el momento de llenado de la torre, el nivel del agua exterior llegue precisamente hasta el borde de la misma. Conviene, no obstante, sujetar el cajón unos instantes antes para luego proceder a su fondeo, por ejemplo, cuando el francobordo sea de unos 0,75 m. También puede suspenderse de una estructura con flotadores si se opta por hacer la torre estanca o auto flotante. El hundimiento debe ser lento y muy controlado con el fin de evitar desviaciones que puedan producirse y que el cajón quede colocado en las coordenadas previstas y correctamente nivelado.

Una vez finalizado el fondeo se procederá a retirar las bridas y tapas ciegas, colocar las rejillas y a realizar la conexión con el inmisario submarino. La torre se protegerá con escollera o muertos de hormigón y se procederá a su balizamiento y señalización con boyas de acuerdo con las instrucciones de la Capitanía Marítima.

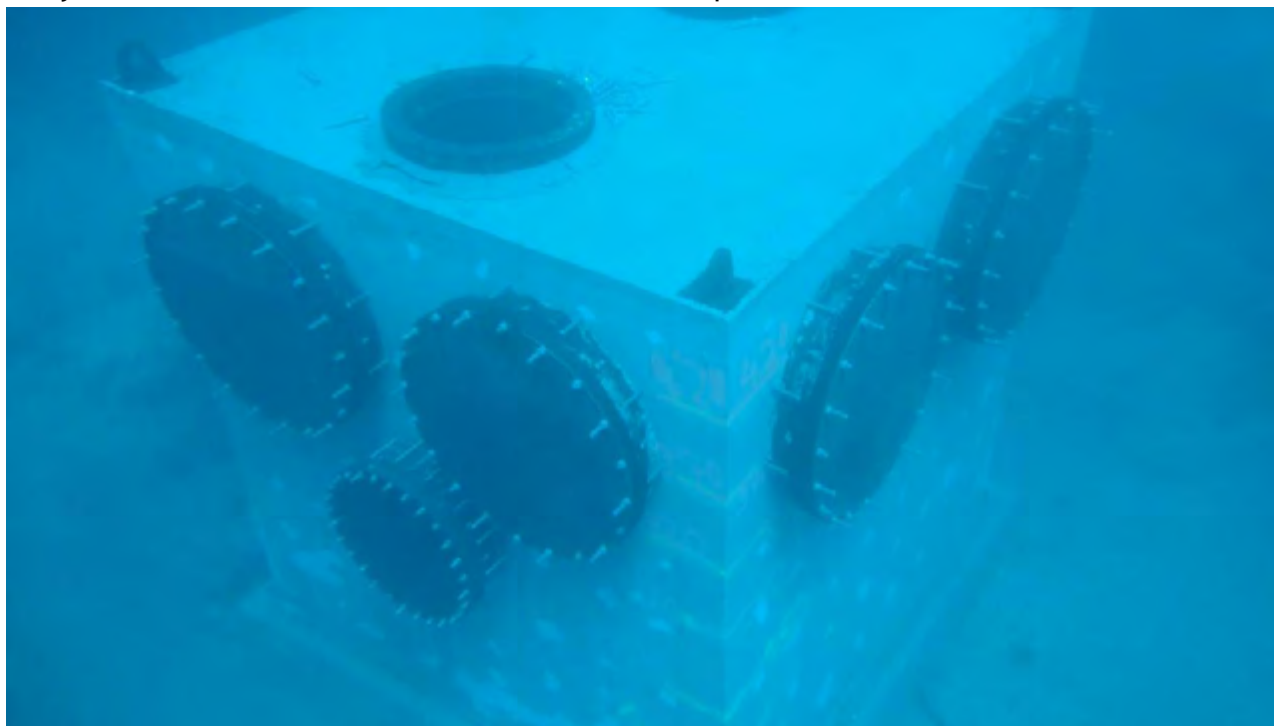


Figura 30. Cajón de toma ya hundido en su posición final. / Tomado de iAgua.



Figura 31. Instalación de tuberías para conducir el agua. / Tomado de iAgua.

2-Inmisario

Para transportar el agua desde el punto de toma hasta el pozo o cántara de bombeo a planta es necesaria la ejecución de una o varias conducciones, condicionadas principalmente por razones ambientales y el grado de afección al ecosistema marino existente. Puede ejecutarse en zanja, mediante hincas o micro-túnel, perforación horizontal dirigida y lastrada al fondo marino.

La ejecución en zanja prácticamente no se utiliza y no se recomienda por su grado de afección a los fondos marinos y por la necesidad de clima marítimo favorable para su ejecución. Actualmente se utilizan las técnicas de micro-túnel, perforación dirigida y lastrado, y para tomas de gran diámetro pueden usarse grandes tuneladoras de frente presurizado con instalación de anillo de dovelas de hormigón armado. Generalmente para la zona de transición tierra-mar se recurre al túnel y a la perforación y, una vez superado este, si es necesario alcanzar una mayor distancia y profundidad se utiliza el sistema lastrado.

El tipo de tubería utilizado varía según el sistema de ejecución, para ejecución en zanja y perforación dirigida se utiliza tubería de polietileno por su resistencia, flexibilidad para su colocación y facilidad de soldadura,

el micro-túnel se ejecuta con tubería de hincas de hormigón armado, en el que puede instalarse tuberías de polietileno o poliéster en su interior o utilizar la misma tubería de hincas como tubería de captación.

El cálculo hidráulico de la conducción debe realizarse teniendo en cuenta el caudal necesario para todas las operaciones de la planta a su máxima capacidad de producción, incluso, las posibles ampliaciones futuras, las pérdidas de carga y el nivel mínimo en la cántara de bombeo que garantice el correcto funcionamiento de las bombas, así como el material de la conducción, rugosidad, etc. Además de los cálculos hidráulicos será necesaria la realización de los cálculos mecánicos de la tubería en función de los materiales y su sistema de ejecución y colocación en zanja, perforación, fondeo lastrado, hincas, etc. Todos los elementos en contacto con el agua de mar deben de ser aptos para consumo humano y no tener en su composición elementos que puedan migrar al agua.

Se describen a continuación los sistemas de ejecución de inmisarios más utilizados en la actualidad.

- Perforación horizontal dirigida (PHD)

Este tipo de sistema consiste básicamente en la ejecución de una perforación horizontal

hasta el punto previsto de salida en el lecho marino, desde donde una vez conseguido el diámetro de perforación necesario estabilizado con bentonita, se conecta con la tubería que previamente se ha lanzado al mar y mediante el tiro de la máquina de perforación se lleva hasta el punto de salida en tierra.

Al igual que cualquiera de los sistemas de perforación es necesaria la movilización de los equipos de perforación, compuestos por una máquina perforadora, estación de mezcla de lodos de perforación, estación de reciclaje de los lodos de perforación, equipos auxiliares tales como camiones de transporte y ayuda a los trabajadores, furgonetas y otros.

En el momento en que la lanza de perforación sale en las coordenadas previstas los buzos proceden al cambio de útiles. Este proceso consiste en el desmontaje de la lanza de perforación, utilizada para los trabajos de direccionamiento de la perforación piloto, y en la instalación de un escariador para proceder al ensanche del micro-túnel hasta el diámetro requerido para la introducción del tubo de servicio.

El ensanche del micro-túnel se realiza progresivamente, es decir, no se pasa del diámetro de perforación piloto directamente al diámetro final, sino que se ejecutan unos

ensanches intermedios. Simultáneamente al proceso de ensanche se procederá a la soldadura de los tubos para posteriormente colocarlos el extremo de salida de la perforación piloto. Será importante tener preparada toda la longitud de la tubería para que en el momento que se tenga abierto el micro-túnel, se pueda lanzar al mar e introducirla de inmediato, y así evitar el riesgo de colapso de la perforación.

Así pues, dependiendo del diámetro necesario se realizan varias pasadas, y entre pasada de escariado se irán realizando limpiezas con un barril, que retirará de la perforación los restos de detritus, que se extraerán por medio de la inyección de lodos bentoníticos por la boca de tierra de la perforación. Para evitar vertidos de material procedente de la perforación los ensanches deben hacerse de mar a tierra.

Para el lanzamiento al mar de la tubería soldada, esta se coloca sobre unos patines y se va introduciendo lentamente en el mar, tirada por un remolcador que la colocará en el punto de conexión con el cabezal de perforación. Una vez la tubería sale por el pozo de entrada, esta queda instalada dentro del túnel, según el trazado seguido para la perforación piloto, realizándose una limpieza interior con un barril, inyectando agua a presión.



Figura 32. Maquinaria y equipamiento para la perforación horizontal dirigida. / Tomado de i.Agua.

Hinca en micro-túnel

Esta técnica se utiliza para grandes diámetros y grandes longitudes ya que la perforación dirigida es muy complicada a partir de los 1.400 mm de diámetro y más de 600 m de longitud. Las micro-tuneladoras, sin embargo, pueden llegar hasta diámetros de 3.000 mm y longitudes de 2.000 m. Para mayores diámetros se utilizan tuneladoras mayores con sistemas de dovelas de hormigón armado.

Las principales instalaciones necesarias para la ejecución de este sistema son las siguientes:

- Pozo de ataque: debe tener espacio suficiente para alojar los componentes de la hinca y proteger la zona de trabajo. Su pared posterior ha de ser capaz de resistir los empujes previstos para colocar la tubería.

- Grúa o sistema de izado y bajada de material al pozo de ataque.

- La cabeza perforadora o micro-tuneladora está formada básicamente por el cabezal de ataque donde van colocados los grupos eléctricos, hidráulicos y compresores, así como los depósitos de aire y combustible y las distintas coronas de corte dependiendo de los terrenos a perforar.

- La cabina de mando ubicada fuera del pozo donde se encuentran los cuadros eléctricos y automatismos, además del panel y sistema de control y de guiado, por lo que el operario-maquinista dispone de total información durante el trabajo.

- Sistemas de reciclado y recirculación de lodos de perforación y balsas de acumulación de detritus.



Figura 33. Tecnología innovadora para la instalación de tuberías en costas. / Tomado de Interempresas.

Hay dos tipos de micro-tuneladoras: de escudo cerrado y escudo abierto, pero para perforaciones con nivel freático alto o de obras bajo el subsuelo marino se utilizan las de escudo cerrado con frente presurizado cuyo objetivo es evitar que el agua penetre al interior del túnel.

Mientras la tuneladora va perforando y abriendo el túnel en su parte posterior se van hincando tubos, generalmente de hormigón armado, dotados de virolas de unión y juntas de estanqueidad especiales para sellar las uniones y evitar la entrada de agua.

Los materiales de la excavación se fluidifican con bentonita y se bombean a una recicladora en la que los sólidos se separan de la bentonita que se vuelve a incorporar al circuito para continuar la perforación, el detritus se deposita en balsas al efecto para su decantación, secado y posterior envío a vertedero.

El panel de mando ofrece la situación exacta de los gatos hidráulicos para el direccionamiento de la cabeza, pudiendo corregir las posibles desviaciones de trayectoria. Estos equipos suelen ir dotados

de un sistema de guiado por láser para conocer en cada momento la posición real.

El elemento de empuje está formado por un sistema de cilindros hidráulicos en número adecuado al diámetro de los tubos que, a través de una corona para repartir esfuerzos, empuja sobre los tubos para introducirlos en la perforación. Dado que los cilindros hidráulicos tienen un recorrido limitado, se colocan unos postizos a medida que el tubo va introduciéndose con el fin de no parar el avance.

Cuando la conducción es de gran longitud, se hace necesaria la utilización de estaciones intermedias de empuje. Estas constan de un sistema de cilindros hidráulicos de carrera corta, cuyo empuje actúa alternándose con el de la estación principal. La longitud de una perforación viene condicionada por la máxima presión que pueden desarrollar los cilindros y, por otra parte, por la resistencia que ofrece la compresión longitudinal de la tubería.

Los tubos de hormigón armado para hincar, por los esfuerzos que deben soportar y por la complejidad del hincado (ya que requiere un

perfecto paralelismo entre sus caras), deben ser diseñados y fabricados siguiendo los más estrictos controles de calidad.

El material de desecho junto con la suspensión se extrae mediante bombas centrífugas a la superficie, donde los lodos bentoníticos se aislarán del escombros mediante una planta separadora y se volverá a inyectar al circuito de alimentación. Los escombros tamizados y secados se evacúan regularmente a vertedero.

Cuando el equipo de hinka finaliza su trabajo, realizando su salida al mar a la profundidad proyectada y en las coordenadas previstas, se procede al cierre y presurización de la cabeza de corte, retirada de todos los elementos de la tubería de hormigón y del pozo de salida, a la inyección del trasdós y a la recuperación de la cabeza de corte por vía marítima mediante una embarcación especialmente preparada para tal fin.

En el interior de la tubería se instalarán las conducciones necesarias de dosificación de reactivos y aire comprimido hasta la torre de toma.

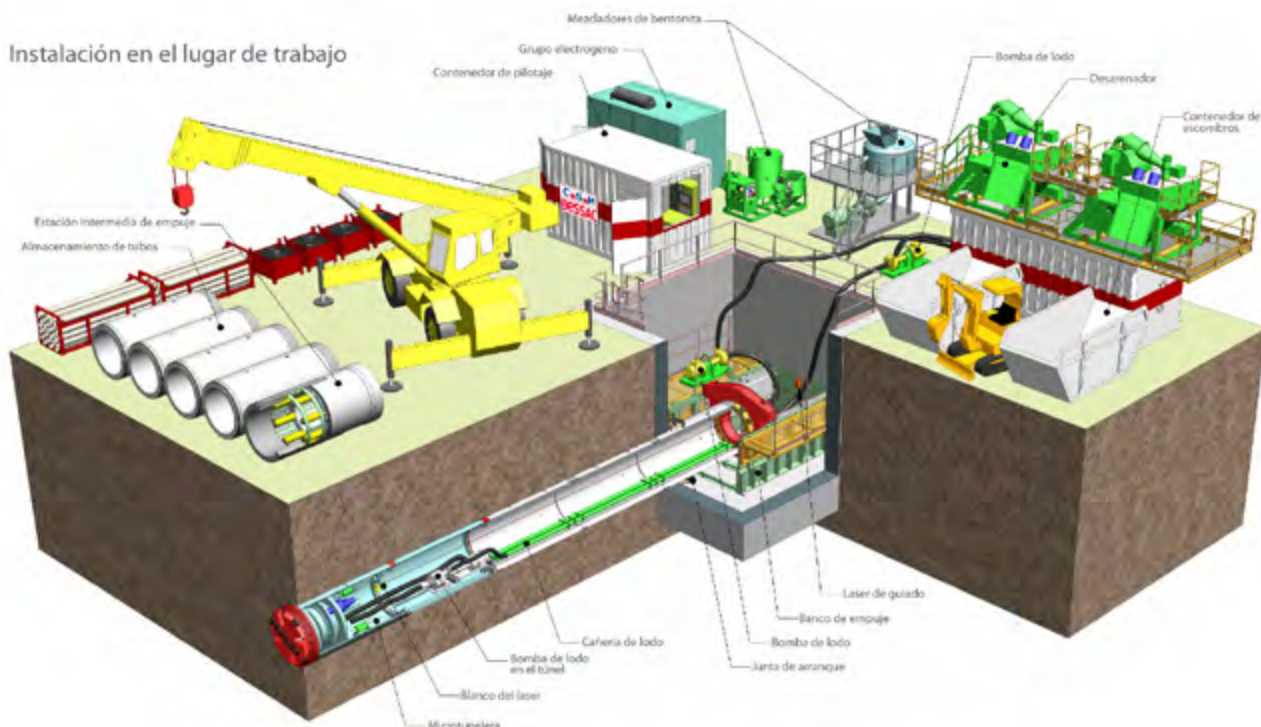


Figura 34. Instalaciones de un sistema de hinka en micro-túnel. / Tomado de iAgua.

Los aspectos a tener en cuenta de esta técnica para realizar conducciones submarinas se indican a continuación:

- Las instalaciones para la ejecución mediante el sistema de micro-túnel son más numerosas y requieren más espacio que la de perforación dirigida.
- Los riesgos son mayores al tener que trabajar el personal en el interior del túnel para el montaje de tuberías de aire, lodos, conducciones eléctricas, guiado, etc.
- En terrenos blandos puede producirse la flotación de los tubos de hincay movimientos durante la fase de ejecución, al encontrarse el tubo vacío que pueden dar origen a que se abra alguna junta y por tanto una vía de agua, para ello es necesario colocar lastres para aumentar el peso de la conducción, sin embargo, estos dificultan el paso de personas y disminuyen las condiciones de seguridad y la rapidez o las labores de evacuación en caso de emergencia.

- Debe tenerse especial cuidado en el control y disposición de las juntas de goma, que deben ser totalmente estancas, de materiales resistentes y adecuados, generalmente con doble junta para mejorar la seguridad.

- En algunos casos la tuneladora puede quedar atrapada siendo dificultoso su rescate bajo el lecho marino.

- Es necesario extremar la seguridad e incorporar apartados muy específicos en el Plan de Seguridad y Salud, donde se recojan los riesgos existentes, las medidas de protección y los planes de emergencia y evacuación.

- Por lo general será necesario colocar en el túnel ventilación forzada y sistemas autónomos de oxígeno a lo largo del mismo, para que, en caso de inundación de éste, los trabajadores expuestos a quedar atrapados pudieran emplearlos hasta su rescate.



Figura 35. Tuberías de polietileno para instalaciones submarinas lastradas. / Tomado de iAgua.

Tubería Lastrada

Generalmente esta técnica no se realiza por sí sola, sino que se ejecuta en combinación con alguna de las dos anteriores. Este sistema no genera afección significativa sobre los ecosistemas marinos, pero sí en los fondos donde se crea una barrera artificial en el

transporte de arenas. La tubería que se suele utilizar para este tipo de ejecución es de polietileno, dada su flexibilidad, resistencia, facilidad de manejo y soldadura.

Las tuberías de polietileno son actualmente el material más comúnmente utilizado en instalaciones submarinas lastradas. La



Figura 36. Lastres de hormigón armado para sujetar las tuberías al fondo marino. / Tomado de iAgua.

combinación de flexibilidad y resistencia las hace superiores a otros materiales. Los diámetros varían en un intervalo de Ø 500 mm - Ø 1600 mm. Para este tipo de conducción sumergida se utiliza como mínimo tubería PE 100, SDR 26 con una presión nominal mínima de 8 bar.

Para su sujeción al fondo se utilizan lastres de hormigón armado. La tipología y forma de los lastres varía en función de las características del fondo, así, para fondos arenosos se ejecutan con patas que se hincan en la arena para asegurar su estabilidad, en fondos rocosos pueden ser circulares, o fondo plano, y por exigencias ambientales en zonas de pradera de posidonia oceánica, se diseñan con apoyos pequeños y sobre elevados para que el tubo no descase sobre la planta y la afección sea la mínima posible.

La tubería puede instalarse con los lastres de una sola pieza o de varias piezas abrochadas mediante pasadores de acero inoxidable o colocarse in situ en la traza de la conducción trasladándose mediante flotadores colocándose uno a uno encima de la tubería, y posteriormente, mediante lanza de dragado actuando sobre las patas, encajar el lastre en el fondo para asegurar su estabilidad. Antes del hundimiento se ha de elaborar

un procedimiento del mismo que tenga en cuenta todas las situaciones relevantes que pueden suceder durante la instalación.

El propósito de los lastres también es proporcionar estabilidad frente a acumulaciones de aire, protección frente a arrastreros, fuerzas debidas a las corrientes y fuerzas debidas al oleaje. Una vez analizados los aspectos ambientales y realizados los cálculos oportunos para el fondeo y lastrado, la primera fase es la soldadura en tierra de los tubos.

Los tubos son trasladados por remolcadores hasta el punto de instalación. El hundimiento de la tubería se lleva a cabo básicamente con las propias fuerzas de la naturaleza, es decir, la gravedad, la flotabilidad y la presión del aire. Se realizará de distinta forma dependiendo de la tipología de lastre colocado, con los lastres abrochados o sin lastres, que se colocarán posteriormente en el fondo. Para el hundimiento sin lastres se colocan elementos de peso en el interior del tubo, generalmente cadenas, y el tubo se va llenando poco a poco con agua por un extremo, mientras sale el aire por el contrario hasta embocarlo con el punto de embridado mediante un tractel lastrado al fondo. Antes de la instalación

debe estar preparado el procedimiento de inmersión detallado y comprobados los cálculos proyectados.

Antes de proceder a la conexión con bridas, la presión interna del aire en la tubería debe ajustarse con la presión a la profundidad de conexión (por ejemplo, +0,3 bares si la profundidad inicial es 3m). También es importante aplicar una fuerza de tracción en el extremo exterior de la tubería antes de que comience el hundimiento. Esta fuerza puede variar a lo largo de la operación de hundimiento y se calculará con especial precisión de antemano.

El hundimiento comienza abriendo con cuidado la válvula de aire en el extremo exterior y controlando la presión interna con un manómetro, si es necesario, para cargar la tubería con aire comprimido. Antes, se habrá calculado una curva que señale la presión de aire necesaria como función de la profundidad de hundimiento. Regulando la presión interna de acuerdo con esta curva, se tendrá un hundimiento controlado con una velocidad casi constante.

La velocidad de hundimiento aproximada puede ser de 0,3m/s.

El factor crítico es el radio de la curvatura en la superficie marina. Si este radio es inferior a 50m aproximadamente en este caso, la tubería corre el riesgo de deformarse por pandeo. Es necesario realizar la operación de hundimiento como un proceso continuo. Si el hundimiento se detiene, el módulo elástico del material de polietileno disminuirá con el tiempo y el radio mínimo de la curvatura se reducirá análogamente. Esto puede provocar una deformación por pandeo en la tubería.

Los datos de la previsión meteorológica y del oleaje son esenciales para preparar el proceso de hundimiento. La altura de las olas no podrá sobrepasar el metro durante la inmersión de la tubería. Si la acción de las olas es lo más reducida posible, aumentará el coeficiente de seguridad contra daños de los tubos. El proceso de hundimiento precisará un período de calma de entre 12 y 48 horas, en función de las longitudes, posibles dificultades y la planificación establecida.



Figura 37. Interior del sistema de conducción antes de ser activado. / Tomado de iAgua.

Durante el hundimiento de la tubería hay que considerar como mínimo los siguientes factores:

- Elaborar un procedimiento detallado del hundimiento, incluyendo los parámetros técnicos, recursos necesarios, sistemas de comunicación y procedimientos de emergencia.
- Realizar cálculos detallados de las curvaturas de hundimiento.
- La velocidad de hundimiento no podrá

exceder los 0,3 m/s.

- Se calculará la curva de presión del aire en función de la profundidad.
- El radio crítico de curvatura es de 50 m aproximadamente.
- El hundimiento se efectuará como un proceso continuo.
- Los contrapesos de hormigón deben sujetarse de manera segura.
- Las condiciones climatológicas deben ser satisfactorias.



Figura 38. Instalaciones en la cántara de bombeo. / Tomado de iAgua.

3-Cántara de bombeo

La cántara o pozo de bombeo es una instalación común a la toma abierta ya que esta generalmente se diseña para trabajar con la presión de la columna de agua del mar menos las pérdidas de carga de la conducción y de la toma. La cota de entrada se diseña teniendo en cuenta las pérdidas de carga de la tubería y la torre de captación, y para las necesidades del caudal de la planta. Tanto la cántara, como la toma y la conducción deben diseñarse de tal manera que la planta sea capaz de bombear al máximo de su capacidad y de las ampliaciones previstas, sin disminución de caudales, niveles y cambios excesivos de velocidad de entrada y transporte.

El pozo de bombeo se realiza generalmente en hormigón armado y dada la profundidad necesaria y la usual existencia de nivel freático

alto debido a la proximidad al mar se recurre a sistemas de muro pantalla para su ejecución, dejando prevista la conexión con el inmisario o perforando con posterioridad, pudiéndose utilizar como pozo de ataque.

Estas instalaciones generalmente disponen de un canal de entrada, unas rejas o tamices de desbaste, que pueden ser mecánicos o manuales. Los equipos de bombeo que habitualmente se instalan son sumergibles, aunque pueden ser de cámara seca con aspiración. También dispondrán de los equipos eléctricos y mecánicos necesarios para su funcionamiento, tuberías de impulsión, válvulas, instrumentación, etc., y de un edificio o sala separada o aislada de la zona húmeda para el control de motores (CCM). 

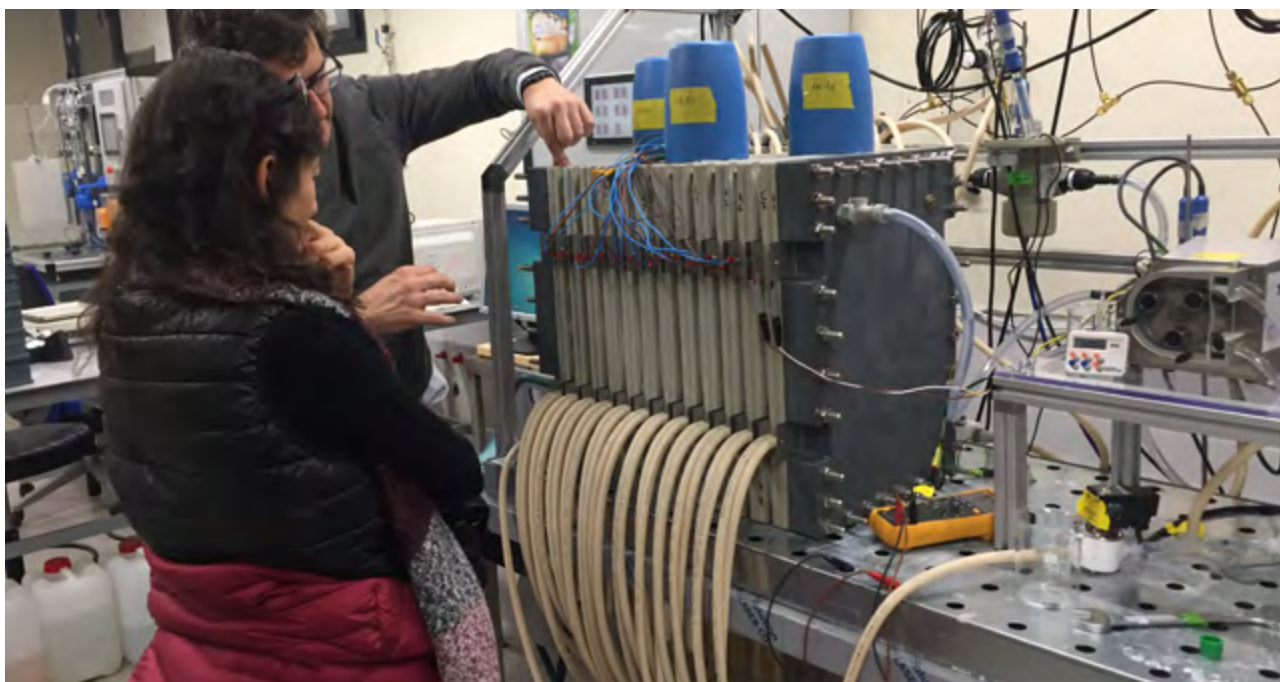


Figura 39. Tecnología de desalación sostenible con microorganismos marinos. / Tomado de Sacyr.

7. Desalinización sostenible: electroquímica microbiana para obtener agua potable con bajo coste energético

La escasez de agua es el desafío más acuciante para el desarrollo socioeconómico y humano, situación que en muchos países se ve agravada a causa del cambio climático, sobre todo en zonas áridas y semiáridas con falta de recursos hídricos. Un modo de paliar la escasez hídrica es recurrir a las tecnologías de desalinización, ampliamente utilizadas para obtener agua dulce en muchas partes del mundo. Las innovaciones tecnológicas en las últimas décadas han dado como resultado una reducción significativa en los costes de energía asociados a las tecnologías de desalación. Sin embargo, las tecnologías actuales (basadas tanto en membranas

como en procesos térmicos) siguen teniendo un alto coste energético. La energía teórica mínima requerida para separar las sales del agua de mar para producir agua dulce es de 0.706 kWh/m^3 . En la práctica, la demanda energética para la desalinización de agua es de alrededor de 3.5 kWh/m^3 para los procesos de RO, y en el caso de los procesos térmicos, este consumo energético puede ser aún mayor (del orden de $5.5\text{-}40 \text{ kWh/m}^3$ para destilación flash multietapa y destilación multiefecto), lo que limita su uso solo en áreas o países con acceso a combustibles baratos.

7.1 Tecnologías de desalinización y emisiones de CO₂

La capacidad instalada de los sistemas de desalinización de agua en el año 2019 era de alrededor de 100 millones de metros cúbicos al día, y se espera que esta cifra crezca en las próximas décadas. Este dramático incremento en la producción de agua desalinizada creará una serie de problemas, entre ellos,

el consumo de energía y la contaminación causada por el uso de combustibles fósiles para obtenerla. La actual preocupación por los problemas medioambientales, las emisiones y el nivel de CO₂ en la atmósfera y los problemas económicos a nivel global derivados de la escasez y de la localización

de las reservas de petróleo mundiales, avivan el debate sobre la viabilidad real de la obtención de agua desalinizada mediante estas tecnologías.

Las tecnologías de desalinización de agua de mar encontraron su primera ubicación en Oriente Medio, en zonas áridas y con escasez de recursos hídricos, pero sin restricciones de energía (combustibles fósiles) y, por consiguiente, con altos ingresos obtenidos por la venta de petróleo. Paradójicamente, en un contexto donde la energía es barata, el agua posee un valor incalculable, por lo que no es de extrañar que las tecnologías de desalinización encontrarán un buen lugar para implantarse y desarrollarse.

Sin embargo, existen otras áreas del planeta donde las poblaciones no cuentan ni con los recursos económicos, ni con los yacimientos de petróleo que les permitan un desarrollo como los anteriores, y no pueden permitirse

la obtención de agua potable mediante estas tecnologías. Por este motivo, la investigación en tecnologías de desalinización se está concentrando en la última década en resolver los puntos clave que permitan extender su uso y lograr la obtención de agua potable en regiones con limitados recursos económicos, como, por ejemplo, reducir el coste económico de los sistemas de desalinización.

Si bien es cierto que el agua de consumo humano representa uno de los principales problemas relacionados con la escasez de agua, es importante indicar que el uso del agua en agricultura y la industria representa aproximadamente el 70 % del uso de agua dulce en áreas o países industrializados, pudiendo llegar al 90 %. Por esta razón, la disponibilidad de recursos hídricos está estrechamente relacionada con el crecimiento económico y los procesos productivos.

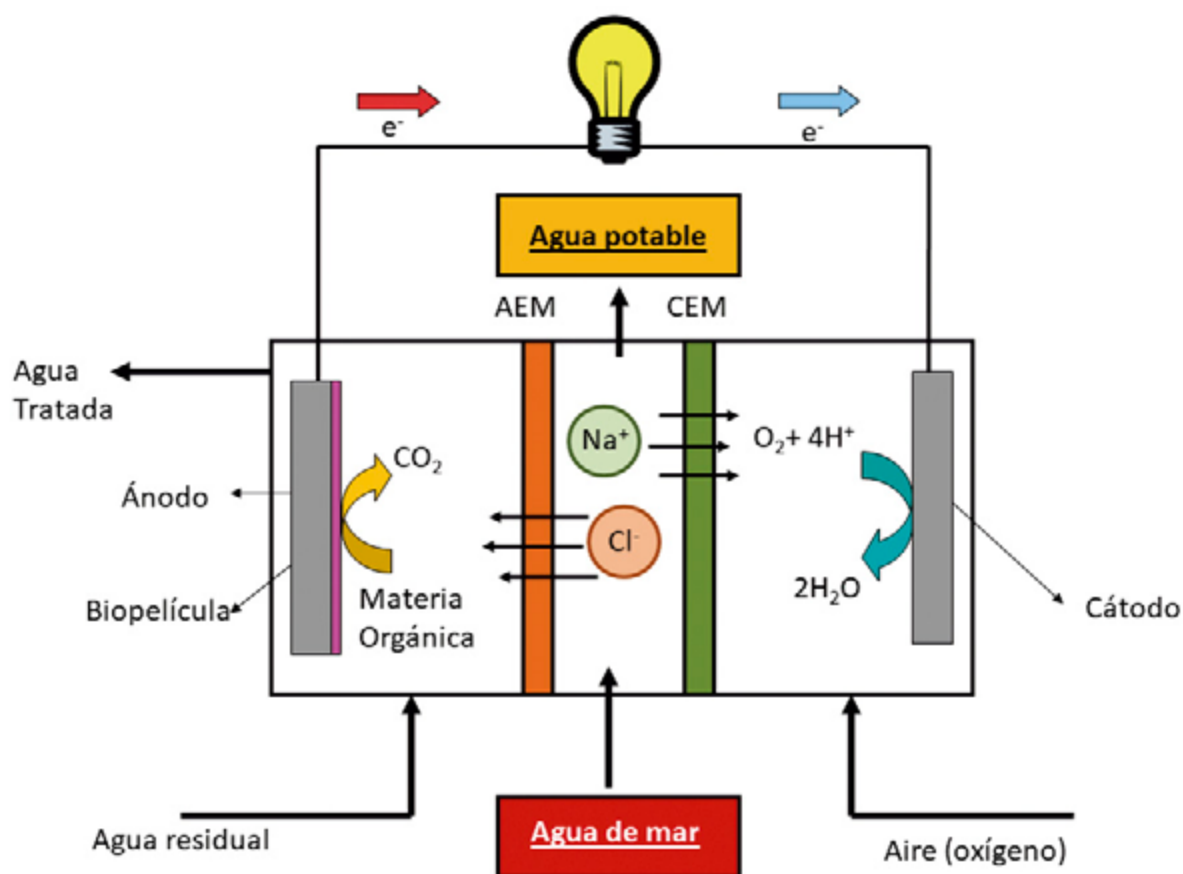


Figura 40. Diagrama de una celda de desalinización microbiana. / Tomado de Revista Técnica de Medio Ambiente.

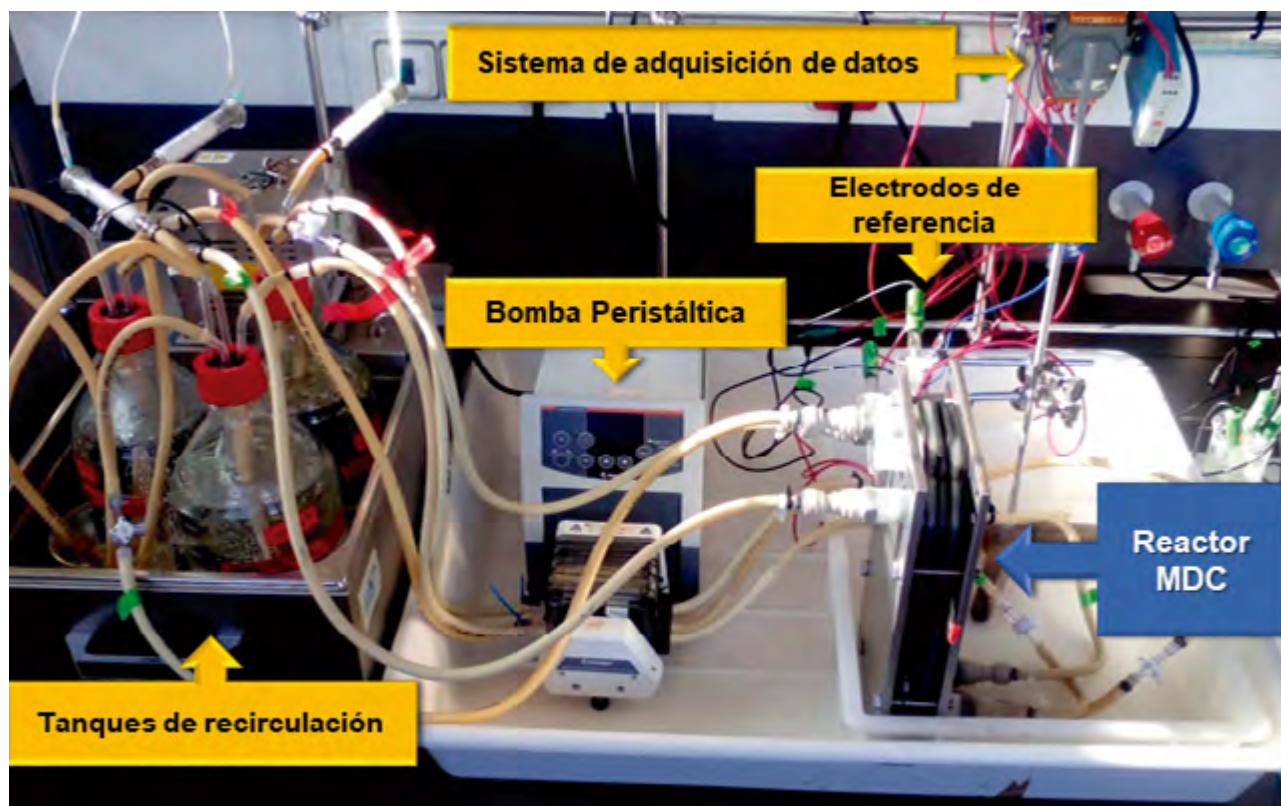


Figura 41. Sistema de celda de desalinización microbiana a escala de laboratorio.
/ Tomado de Revista Técnica de Medio Ambiente.

7.2 Biotecnología para desalinización sostenible

En los últimos años se han propuesto nuevos conceptos de desalinización sostenible como, por ejemplo, la integración de sistemas de desalinización con energías renovables (fotovoltaica o térmica); nuevas tecnologías de membranas para su uso en procesos de ósmosis directa (FO); la mejora en los pre y post-tratamientos; la recuperación de energía por gradiente salino; el reciclaje de membranas (referencia), y los sistemas de desionización capacitiva para eliminación de contaminantes inorgánicos, entre otros.

A la búsqueda de un nuevo paradigma para la obtención de agua potable con bajo coste y con nulas emisiones de CO₂, la biotecnología ha irrumpido en la última década en el ámbito de la desalinización para proporcionar soluciones al problema de la escasez de agua. Entre las propuestas se encuentra la biodesalinización, que emplea cianobacterias o microorganismos halófilos. No obstante, la biodesalinización sostenible

se encuentra en sus etapas iniciales a escala laboratorio, y la producción de agua es escasa todavía para pensar en una aplicación real.

Sin embargo, hay que destacar el interés que ha suscitado en el ámbito científico el concepto de las celdas de desalinización microbiana y que supone la hibridación de celdas microbianas de combustibles con electromembranas. Esta tecnología permite la obtención de agua empleando la energía contenida en efluentes con contenido de materia orgánica (por ejemplo, aguas residuales), y es objeto de investigación y desarrollo en los últimos 10 años. 



Figura 42. Planta para el tratamiento descentralizado de aguas residuales. / Tomado de Aguasresiduales.info.

Los beneficios de la desalinización descentralizada .8

Las grandes plantas de desalinización tradicionales pueden tener la ventaja de la economía de escala, pero la flexibilidad y eficiencia de las plantas descentralizadas las convierten en una opción superior en muchas situaciones.

La desalinización descentralizada simplemente significa ubicar las plantas de desalinización más pequeñas cerca de una fuente de demanda de agua dulce y un suministro de agua salina. Debido a los costos de construcción y operación históricamente altos de las plantas de desalinización, muchas plantas de desalinización grandes se han construido para aprovechar las economías de escala, entregando agua dulce a un precio aceptable.

Sin embargo, el financiamiento, la construcción y la operación de estas grandes plantas a menudo conllevan gastos paralizantes para el área del servicio.

Pero ahora, los avances en tecnología y paquetizado están haciendo que las plantas de desalinización descentralizadas de tamaño pequeño y mediano sean una solución viable en una amplia gama de situaciones. Estas plantas ágiles y eficientes en el consumo de energía, basadas en la tecnología de RO, están eliminando obstáculos que han disuadido a las entidades más pequeñas con menos recursos de tomar el control del futuro del agua con la desalinización.

Aquí es donde el tratamiento descentralizado es valioso. Las plantas desalinizadoras descentralizadas de pequeña o mediana escala pueden ubicarse de manera más fácil directamente adyacentes a la demanda, minimizando la construcción de la tubería. 

Referencias

- **Adentra. Ong. (s. f).** *Agua de mar: aplicaciones en el ámbito de la cooperación para el desarrollo humano y sostenible.* <https://adentra.org/agua-de-mar/>
- **Al-Karaghoul, A., & Kazmerski, L.L. (2011).** *Renewable energy opportunities in water desalination. Desalination, trends and technologies.* National Renewable Energy Laboratory Golden, Estados Unidos. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj3ufr6rvfzAhWPZzABHXyXCDsQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fnmwaterconference.nmwrri.nmsu.edu%2Fwp-content%2Fuploads%2F2011%2FRelevant-Papers%2Frenewable_energy_water_desal.pdf&usg=AOvVaw2GVJ_jShhaowVO_aLfaem9
- **Asociación Española de Desalación y Reutilización (AEDyR). (2019).** *Desalación del agua por ósmosis inversa.* <https://aedyr.com/que-es-osmosis-inversa>
- **Asociación Española de Desalación y Reutilización (AEDyR). (2020).** *Aplicaciones en industrias de la ósmosis inversa.* <https://aedyr.com/aplicaciones-industrias-tratamiento-agua-osmosis-inversa/>
- **Dévora, G., González, R., y Ruiz, S. (2018).** Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(3), 27-46. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000300002
- **Jiemenes Barahona, H. (2019).** *Evaluación de la viabilidad para la implementación de plantas desalinizadoras usando energías renovables en la región de la guajira colombiana.* Fundación Universidad de América. <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7253/1/480689-2019-I-GA.pdf>
- **Fluence Corporation. (2020).** *Los beneficios de la desalinización descentralizada.* <https://www.fluencecorp.com/es/beneficios-de-la-desalinizacion-descentralizada/>
- **Orostizaga Salinas, E. L. (2018).** *Diseño preliminar de captaciones costeras de agua de mar aplicación en la costa central y norte de Chile.* [Tesis de Diploma, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile]. Repositorio Institucional USM. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi3iNvtvfzAhWxQzABHUBBAZEQFnoECAUQAQ&url=https%3A%2F%2Frepository.usm.cl%2Fbitstream%2Fhandle%2F11673%2F23242%2F3560900257122UTFSM.pdf%3Fsequence%3D1&usg=AOvVaw0buBpEI4I9eF4GZDBTpcao>
- **Ortiz, J. M., Barroeta, B., y Esteve-Núñez, A. (2020).** Desalinización sostenible: electroquímica microbiana para obtener agua potable con bajo coste energético. *RETAMA Revista Técnica de Medio Ambiente*, 226. <https://www.retema.es/articulo/desalinizacion-sostenible-electroquimica-microbiana-para-obtener-agua-potable-con-baj-RIA2>
- **Pedraza Corzo, H. D., y Vesga Gómez, D. M. (2019).** *Dimensionamiento y simulación de un sistema solar térmico tipo fresnel para la desalinización de agua de mar ubicado en el departamento de la Guajira.* [Tesis de Diploma]. Universidad Autónoma de Bucaramanga, Colombia]. Repositorio Institucional UNAB. https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/7259/2019_Tesis_Hernan_Dario_Pedraza_Corzo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- **Sánchez, J. M., Casañas González A., García Sánchez-Colomer M. R., y Zarzo Martínez, A. J. (2009).** *Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano*. Informes, Estudios e Investigación, Ministerio de Sanidad y Política social, Madrid. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwim8-zVu_fzAhWYTTABHWniAZkQFnoECAIQAAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.mscbs.gob.es%2Fprofesionales%2FsaludPublica%2Fdocs%2FGuia_desalacion.pdf&usg=AOvVaw2Bpi_ka2TE3PIF2DHHv7VJ
- **Shatat, M., & Riffat Saffa, B. (2014).** Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 1(9), 1-19. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>
- **Bello, M. M. (2019).** *Sistemas de captación en desaladoras de agua de mar*. <https://www.iagua.es/blogs/mario-miguel-bello/sistemas-captacion-desaladoras-agua-mar>
- **Tejedor, C. (2008).** *Introducción a la Desalación por ósmosis inversa. Conceptos Básicos*. EOI Escuela de Organización Industrial. <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/20082/introduccion-la-desalacion-por-osmosis-inversa-conceptos-basicos>
- **I'MNOVATION #Hub. (2020).** *Una tecnología que multiplica la eficiencia de las plantas desalinizadoras*. <https://www.imnovation-hub.com/es/agua/tecnologia-multiplica-eficiencia-plantas-desalinizadoras/>
- **Voutchkov, N. (2013).** *Desalination Engineering: Planning and Design*. Water Globe Consulting, LLC. https://www.academia.edu/31057784/Desalination_Engineering_Planning_and_Design_pdf



<http://www.octi.cu>



[/+53 7203 1851](tel:+5372031851)



octi@idict.cu



[/octicuba](https://www.facebook.com/octicuba)



[@OCTICuba](https://twitter.com/OCTICuba)



t.me/octicuba



OCTI

Observatorio
Científico
Tecnológico
y de Innovación

C I E N C I A
P A R A T O D O S