

**DESALINIZACION: OTRO IMPORTANTE SISTEMA DE POTABILIZACION
MASIVA**

LISSETH MAYERLY SIERRA RANGEL

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL
PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER**

2016

DESALINIZACION: OTRO IMPORTANTE SISTEMA DE POTABILIZACION

MASIVA

INVESTIGADOR

LISSETH MAYERLY SIERRA RANGEL

TRABAJO DE GRADO

PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERA AMBIENTAL

MONOGRAFIA

DIRECTOR

JULIO ISAAC MALDONADO M.

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

PROGRAMA DE INGENIERA AMBIENTAL

PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER

2016

Dedicatoria

Dedico este logro a Dios por su infinita bondad, por darme sabiduría, paciencia y entrega en el transcurso de mi formación académica y profesional, a mi madre Olga Inés Rangel y mi padre Elibardo Sierra por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí y en mis expectativas, por su amor, sus consejos, paciencia, apoyo y entrega incondicional, a pesar de los tantos errores cometidos, gracias a ellos veo realizado uno de mis propósitos de vida. A mi hermana Maritza que a pesar de tener nuestras eventuales discusiones y malos momentos, ha sido una de las principales personas involucradas en mi superación y por enseñarme que todo es posible si se tiene a Dios.

Agradecimientos

A DIOS ser maravilloso que me dio fuerza y fe para creer en lo que me parecía imposible terminar, como lo es mi carrera universitaria, por mi vida y lo bondadoso que ha sido conmigo.

A mis padres por todo el sacrificio y esfuerzo que han realizado por darme una educación de calidad.

A la Universidad de Pamplona por permitir ser parte de esta institución para realizar mis estudios de pregrado, así como también a los diferentes docentes de la facultad de ingenierías y arquitectura que me brindaron sus conocimientos.

A todos aquellos amigos y compañeros de clase ya que gracias al compañerismo, amistad y apoyo moral aportaron en mí, ganas de seguir luchando por este sueño.

A los docentes del diplomado en nuevas tecnologías de potabilización, por su valioso aporte, conocimientos e ideas propias en las diferentes temáticas y módulos.

INFINITAS GRACIAS...

Contenido

Dedicatoria.....	3
Agradecimientos	4
Contenido.....	v
Resumen.....	9
Abstract.....	10
1 Introducción.....	12
2 Capítulo 1	15
2.1 Historia de la desalinización del agua	15
• 2.1.1 Reseña histórica.....	15
• 2.1.2 Motivación de la producción de agua dulce	20
3 Capítulo 2	22
3.1 Fundamentos importantes de la desalinización del agua.....	22
• Sólidos disueltos totales (SDT).	22
• 3.1.1 Calidad de aguas en función de su salinidad	24
• 3.1.2 Agua salobre	26
• 3.1.3 Salmuera	29
4 Capítulo 3	32
4.1 Tecnología de la desalinización.....	32
• 4.1.1 Sistemas térmicos	33
• 4.1.2 Sistemas por membranas	38
• 4.1.3 Electrodiálisis	43
4.2 Otros métodos para su desarrollo.	46
• 4.2.1 Desalinización por congelación.....	46
• 4.2.2 Desalinización mediante evaporación relámpago	47
• 4.2.3 Desalinización mediante formación de hidratos.....	48
• 4.2.4 Comparación entre sistemas térmicos y de membranas	49
5 Capítulo 4	50

5.1	Desarrollo tecnológico de la desalinización de agua.....	50
•	5.1.1 Industrias de desalinización.....	51
6	Capítulo 5	57
6.1	La desalinización en Colombia.....	57
•	6.1.1 Planta Desalinizadora En Manaure (La Guajira).....	58
•	6.1.2 Construcción Y Operación De Una Planta Desaladora En Campos Petrolíferos De Colombia.....	60
•	6.1.3 Proyecto "Desaladora reversible" Almeria.....	62
•	6.1.4 Planta De Ósmosis Inversa Agua Potable Para Uribía, Colombia	62
7	Capítulo 6	65
7.1	Marco legal y normativa para el proceso de desalinización en Colombia	65
8	Capítulo 7	68
8.1	Impacto ambiental de la desalinización.....	68
•	8.1.1 La desalinización en el proceso de potabilización del agua	68
•	8.1.2 Desalinización y la contaminación atmosférica	70
•	8.1.3 Desaladoras y emisiones de CO2	70
•	8.1.4 Desalación con energías renovables	73
•	8.1.5 Sistemas de desalación acoplados a sistemas de energías renovables.....	74
•	8.1.6 Problemas y soluciones de la desalación con energías renovables	75
9	Ventajas y desventajas de la desalinización del agua.....	76
10	El Futuro de la Desalinización.....	78
10.1	Costos	81
11	Conclusiones.....	84
12	Recomendaciones	86
13	Bibliografía.....	88

Índice de figuras

Ilustración 1. Esquema de un sistema de desalinización.	32
Ilustración 2. Esquema de destilacion por compresion mecanica de vapor.....	34
Ilustración 3. Proceso de desalinizacion mediante MSF.	35
Ilustración 4. Proceso de destilación multiefecto (MED).....	36
Ilustración 5. Desalinización solar.....	38
Ilustración 6. Desalinización por osmosis inversa.....	39
Ilustración 7. Esquema general de una planta de electrodiálisis.....	44
Ilustración 8. Esquema general de una planta de electrodiálisis reversible.....	45
Ilustración 9. Desalinizacion por congelacion.....	46
Ilustración 10. Desalinización mediante evaporación relampago.....	47
Ilustración 11. Desalinización mediante formación de hidratos.....	48

Índice de tablas

Tabla 1. Composición química promedio del agua de mar	23
Tabla 2. Contenido de sales en los diferentes océanos y mares.....	24
Tabla 3. caracterización del agua en función de su salinidad	25
Tabla 4. Clasificación de los procesos de desalinización	25
Tabla 5. Salinidad de diferentes tipos de aguas	26

Resumen

La presente monografía se realiza como requisito de grado dentro del DIPLOMADO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN POTABILIZACIÓN, es importante puesto que permite investigar bibliográfica y teóricamente todo lo relacionado con la desalinización del agua. Hoy en día, la desalación o desalinización se ha convertido en una solución asequible para las reducciones de agua potable en áreas típicamente tropicales, así como costeras.

Es un proceso por el cual el agua de mar puede convertirse en un recurso hídrico perfectamente aprovechable tanto para el consumo humano, como para el riego y usos industriales.

Para eso, se separan las sales que contiene el agua marina para llegar a los 0,5 gramos por litro del agua potable, aproximadamente.

Existen diversos procesos de desalinización y se diferencian por costos, impacto ambiental, calidad del producto y energía consumida. Mediante comparación entre procesos térmicos y de membranas se encontraron las diferentes tecnologías existentes para desalar agua de mar, tecnología utilizada, fuentes de abastecimiento y uso del agua desalinizada. Los procesos de desalinización se realizan desde 1970, siendo por membrana: ósmosis inversa (OI), electrodiálisis (ED), nano filtración (NF); por sistemas térmicos: destilación múltiple etapa (MED), destilación *flash* múltiple etapa (MSF) y destilación solar (DS). Las fuentes de abastecimiento más utilizadas son agua de mar (60%) y agua salobre (22%). La comparación entre tecnologías permite determinar que el consumo energético y costo de producción de OI es menor y con mayor producción de agua desalinizada; además presenta ventajas significativas sobre el resto debido a que no requiere cambios de estado, como en MED y MSF. La OI es el proceso más viable en producción, energía consumida y costo.

Palabras clave: recurso hídrico, ósmosis inversa, electrodiálisis, destilación, desalinización, calidad del agua.

Abstract

The present monograph is performed as a grade requirement within the DIPLOMATIC OF NEW TECHNOLOGIES IN POTABILIZATION, it is important since it allows to investigate bibliographically and theoretically everything related to the desalination of water. Today, desalination or desalination has become an affordable solution for drinking water reductions in typically tropical as well as coastal areas.

It is a process by which sea water can become a water resource perfectly usable for human consumption, as well as for irrigation and industrial uses.

For that, the salts containing the sea water are separated to reach the 0.5 grams per liter of the drinking water, approximately. There are several desalination processes and are differentiated by costs, environmental impact, product quality and energy consumed. By comparing thermal and membrane processes, the different existing technologies for desalination of seawater, technology used, sources of supply and use of desalinated water were found. Desalination processes have been carried out since 1970, being membrane: reverse osmosis (OI), electro dialysis (ED), nano filtration (NF); By thermal systems: multiple stage distillation (MED), multiple flash distillation stage (MSF) and solar distillation (DS). The most commonly used sources of supply are sea water (60%) and brackish water (22%). The comparison between technologies makes it possible to determine that the energy consumption and cost of production of OI is lower and with higher production of desalinated water; In addition it presents significant

advantages over the rest because it does not require state changes, as in MED and MSF. OI is the most viable process in production, energy consumed and cost.

Keywords: Water resource, reverse osmosis, electro dialysis, distillation, desalination, water quality.

1 Introducción

El agua es un compuesto esencial para la vida y las actividades que se efectúan en pro del sustento del ser humano, como los procesos industriales, y la producción agrícola y ganadera, entre otros; este líquido también es un factor influyente para impulsar la economía de un país; sin embargo, ya se están presentando problemas en la actualidad por el déficit del vital elemento, ya que el tamaño de la población es muy grande y esto origina grandes esfuerzos para abastecer de agua a todos, incluyendo a los sectores productivos, por ello la preocupación mundial por la escasez de agua es inobjetable y cada día se encuentran más problemas por falta de agua dulce y procesos que contaminan e impactan al medio ambiente (VALENCIA, 2000)

Las proporciones de agua en la Tierra, según (AL-SOFI, 2001), indican que solamente el 2.5% representa agua dulce y de ésta, el 68.7% corresponde a los glaciares, los cuales no pueden ser utilizados para obtener agua dulce, ya que son parte fundamental de los ecosistemas de la hidrosfera; en las aguas superficiales y atmosféricas, los lagos de agua dulce representan el 67.4%, pero la mayor parte está contaminada; el consumo de agua dulce se utiliza para la agricultura y la industria, y sólo el 10% es de uso doméstico (LECHUGA, 2007).

(NOGUEIRA, 2011) Menciona que la población del mundo en estos dos últimos siglos ha aumentado con rapidez, para dar un total de alrededor de 6 700 millones de seres humanos. El problema no se detiene allí. En la actualidad, la población mundial crece a un ritmo de 78 millones de personas al año. Inclusive, de mantenerse las tasas de natalidad invariables, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) calcula que la población mundial para el año 2050 será de 11 900 millones de personas.

Así, se han buscado soluciones para aportar agua en el corto y mediano plazos. Si bien no se puede obtener agua de forma directa, sí por medio de distintas tecnologías (MEDINA, 2000).

La desalinización se vislumbra como una tecnología viable que aporta agua al ciclo hidrológico y que no compite con otros sistemas, como los trasvases.

El agua, elemento indispensable para la vida, compone el 71% de la superficie del planeta. Paradójicamente, sólo el 3,5% de esta agua es apta para el consumo del ser humano, que se sirve de lagos, ríos y manantiales para abastecer sus necesidades físicas e higiénicas. El 96,5% restante, localizado en mares y océanos, no es potable dado su alto nivel de salinidad.

¿Cómo aprovechar esta inagotable fuente de vida? La tecnología de la desalación del agua lo hace posible. El hombre ha ideado multitud de sistemas para convertir el agua de mar en agua potable y poder así suministrar a la población con mayores dificultades de acceso a agua dulce.

Métodos como la electrodiálisis, la electrodiálisis inversa, la destilación instantánea en múltiples etapas o la destilación multiefecto funcionan en plantas desalinizadoras de todo el mundo. Sin embargo, el sistema más extendido y más avanzado es la desalación del agua por ósmosis inversa, cuya implantación supone el 61% respecto a los demás sistemas.

La desalación de agua de mar es una propuesta para asegurar el suministro hídrico de manera sustentable. El proceso es una tecnología limpia que no produce emisión de gases ni ruidos molestos logrando la separación de las sales del agua en la que están disueltas, hasta los niveles que permitan hacerla apta para el consumo humano.

Algunas regiones del mundo tienen acceso reducido al agua potable y en otras regiones su uso está limitado por la contaminación. Inclusive, muchas áreas húmedas sufren la escasez del agua debido a los deficientes sistemas y prioridades de distribución.

El resultado de todo esto es que el agua escasea y los servicios de suministro y saneamiento son insuficientes.

2 Capítulo 1

2.1 Historia de la desalinización del agua

Durante los últimos años, la desalación del agua de mar y salobre ha experimentado un enorme incremento. La idea de convertir en agua dulce las inagotables fuentes del mar, posee indudablemente un profundo atractivo que ha trascendido a todas las edades.

2.1.1 Reseña histórica.

Quizá la más antigua referencia que existe sobre la desalación del agua de mar es el relato que aparece en la Biblia (Éxodo, capítulo 15, versículo 22-25): «Al mando de Moisés, los hijos de Israel partieron del mar Rojo. Avanzaron hacia el desierto del Sur y marcharon por él tres días sin hallar agua. Llegaron a Mara, pero no podían beber el agua por ser amarga [por eso se dio a este lugar el nombre de Mara]. El pueblo murmuraba contra Moisés, diciendo: ¿Qué vamos a beber? Moisés clamó a Yavé, que le indicó un madero que él echó en el agua, y esta se volvió dulce».

Referencias más concretas se encuentran ya en Tales de Mileto (624-547 a.C.) y Demócrito (460-370 a.C.), quienes sugirieron que el agua dulce se obtenía por filtración del agua de mar a través de la tierra. Aristóteles (384-322 a.C.) abordó en sus obras diversos aspectos del problema del agua; discutió acerca de la naturaleza y propiedades del agua de mar y la posibilidad de su desalación. Plinio (23-79 d.C.), en su gran enciclopedia sobre historia natural describe varios métodos para desalar agua. Alejandro de Afrodisias (193-217 d.C.), al comentar la Meteorológica de Aristóteles, describe por primera vez el procedimiento de destilación como método de obtención de agua dulce a partir de agua de mar. En la Edad Media varios autores trataron el problema de la desalación del agua de mar, entre los

que se puede citar a John Gaddesden (1280-1361), que en su obra *Rosa medicine* describe cuatro métodos para la desalación del agua de mar.

En la Edad Moderna se multiplican las observaciones científicas debido a los descubrimientos geográficos, la expansión del comercio y los largos viajes a través de los mares. Ello implica un nuevo avance en el problema de la desalación del agua, especialmente en lo que se refiere al abastecimiento de las tripulaciones de los buques.

Andrés Laguna (1499-1560), médico personal del rey de España, Carlos I, en sus comentarios escritos sobre la materia médica, de Dioscórides, cita diferentes métodos de desalación. Giovan Battista Della (1535-1615) publicó en 1589 la segunda edición de su *Magiae naturalis* en veinte tomos y en el último describe los métodos de obtención de agua dulce a partir de agua salina conocidos en la época. Este autor tiene el mérito de haber hecho un estudio crítico de dichos métodos y comprobar experimentalmente algunos.

A comienzos del siglo XIX ya eran conocidos los principios de los métodos de desalación que podemos llamar naturales, concretamente la evaporación solar, la destilación y la congelación. El uso industrial de estos principios tuvo en cambio un lento desarrollo, excepto en las instalaciones de destilación para barcos, cuyo crecimiento fue relativamente rápido. La destilación tuvo un primer impulso de desarrollo en el año 1884, cuando James Weir creó, con destino a barcos, una planta de evaporación que utilizaba la energía residual del vapor de salida de la caldera. Desde 1884 hasta 1956 el tipo de destilación de tubos sumergidos sirvió de base a la mayoría de las instalaciones marinas de esta naturaleza, y en la época final a instalaciones terrestres. (Santana, 2015)

Las primeras instalaciones de este tipo, de las que se tiene noticias, son una en Egipto, instalada en 1912, cuya producción era de 75 m³/día; otra en Stears, Kentucky (Estados Unidos), montada en 1917 con una producción de 150 m³/día, y otras en las islas de Aruba y Curazao, de 6 500 m³/día, instaladas en el período 1956-1958. Fue precisamente el aumento de capacidad de estas plantas terrestres lo que llevó al abandono del principio de tubos sumergidos, ya que el sistema era difícilmente adaptable a capacidades mayores.

El desarrollo de la evaporación súbita se inicia con el fin de las instalaciones de tubos sumergidos, a las que prácticamente viene a sustituir. El punto de comienzo de la era industrial de la evaporación súbita se puede enmarcar en 1956, en que la compañía Westinghouse comenzó la instalación en Kuwait de una planta de 2 273 m³/día.

Aunque se ha clasificado el procedimiento de congelación como uno de los de base natural, pues entre los esquimales es la forma habitual de obtención de agua, la realidad es que no se desarrolló sino mediante estudios de laboratorio independientes de dichas condiciones naturales. El desarrollo industrial de este método tiene su iniciación en los últimos años de la década de los cincuenta.

Los sistemas de compresión de vapor y de tubos verticales largos pueden considerarse variaciones de los métodos básicos de destilación. El nacimiento de su desarrollo coincide también con la década de los años cincuenta.

El empleo de los sistemas de membranas se inicia a partir de los estudios en laboratorios sobre la

naturaleza y comportamiento de aquellas, con los trabajos realizados sobre membranas fabricadas con resinas por Juda y Kressman en 1949, aunque las propiedades de semipermeabilidad y selectividad eran conocidas desde principios del siglo XIX.

Las primeras instalaciones de tipo industrial se reportan a partir de 1950. Los sistemas de intercambio de iones eran conocidos desde el siglo XIX, aplicados en multitud de industrias químicas y para desmineralizar aguas que no tuvieran más de 1,5 g/L de sales disueltas; sin embargo, su desarrollo comienza en la década de 1950. Existe, hoy en día, una primera central o planta desalinizadora en España, la que instalada en el año 1965 en Lanzarote, marcó la pauta de las más de 700 plantas que hoy recorren todo el país y que para el año 2005 logró producir la misma cantidad que se utiliza en un par de horas de agua dulce de forma natural.

Algunos ejemplos en el mundo pueden ser el del Golfo Pérsico, y en Sudamérica la que está emprendiendo Chile, país en vías de desarrollo que tiene un clima desértico amplio en el norte y que necesita de agua para todos sus proyectos cupríferos. Gracias al informe desarrollado por COCHILCO (Comisión Chilena del Cobre), que las reservas de agua dulce para los planes que comienzan en el 2010 y se proyectan hasta el 2020, la actividad minera está seriamente amenazados por la escasez de agua, lo que hace imperioso el realizar un proyecto serio a través del cual se evalúe la implementación de una planta desalinizadora con fines industriales.

De esta forma la frase que afirma "sin agua no hay minería", termina por sentenciar a Chile a buscar iniciativas abiertas para la implementación urgente de una planta o varias plantas desalinizadoras en el norte del país, de esta forma el informe de COCHILCO vislumbra la implementación de una de estas plantas en la segunda región (zona minera más activa en el país),

pues necesitará un consumo del 57% del agua que utiliza la industria cuprífera entre la primera y cuarta región. Así, en el desglose de necesidades de agua en la zona norte nos encontramos con lo siguiente: La primera región consumirá un 18%, la tercera región un 17% y la cuarta región un 8%.

En el siglo pasado se empezaron a utilizar algunos destiladores pequeños en barcos. Las primeras unidades para producir agua para consumo humano en gran escala usaban la tecnología de destilación en múltiples efectos con tubos sumergidos, donde la seguridad de funcionamiento era más importante que el costo del agua producida. En la década de 1940, aparecen en Kuwait, Aruba y las Antillas Holandesas, los primeros destiladores de 1 o 2 m³/d para uso en barcos. En la década de 1950 se inician las primeras investigaciones sobre desalinización, con el objeto de construir grandes instalaciones de producción de agua dulce, y se obtienen resultados importantes, como el sistema de destilación súbita en 1957, lo que permite construir la primera planta comercial en 1960 (Custodio, 1976). Hoy día, el agua desalinizada se utiliza para consumo humano, en procesos industriales y, en forma muy limitada, para riego agrícola, pues los costos de desalinizar agua son relativamente altos para usar este líquido con los métodos tradicionales de riego; resulta más económico importar los productos agrícolas de aquellos países que cuentan con las condiciones climatológicas adecuadas para producirlos.

La desalación ha contado con una larga prehistoria de ideas y mitos, y una historia inferior a un siglo de realizaciones prácticas.

2.1.2 Motivación de la producción de agua dulce

El agua ocupa aproximadamente el 71% de la superficie de la tierra. Sin embargo, el 97% de este recurso disponible en el planeta está en los océanos, es decir, es salobre y no apto para el consumo humano. Estas aguas tienen una gran cantidad de Cloruro de Sodio, también conocido como sal. Otros minerales que se encuentran son el cloruro de magnesio, el sulfato de magnesio y el sulfato de calcio. La salinidad del agua del mar varía de un lugar a otro debido a los aspectos climáticos, especialmente la temperatura, que influye en la evaporación. La cantidad media de sal es de un 35% (35 g de sal por cada litro de agua). Algunos mares se encuentran por debajo de los valores promedio, por ejemplo, el Báltico, con el 0,02% de la salinidad. Por otro lado, el Mar Muerto tiene un 250% de salinidad. Los océanos, por su abundancia, son de gran importancia para la humanidad. Debido al aumento del consumo y la escasez de agua potable en varias partes del mundo, se hizo necesario poder convertir agua salada en agua dulce.

El agua es el componente de todo sistema biológico que permite la vida a las plantas, animales y humanos. El agua dulce de fuentes naturales es un recurso muy limitado (menos del 2 % del agua de la Tierra es dulce) y así define límites al aprovechamiento de los otros recursos como el espacio y el alcance de condiciones para la agricultura. (SARTORI, 2003)

El mar contiene el 98 % del agua del planeta. Entre 25.000 y 45.000 ppm (2,5 a 4,5 %) del agua del mar son sólidos disueltos, también conocidos como TDS por las siglas de la expresión inglesa *total dissolved solids*. Se considera agua dulce aquella cuyo contenido en sal es inferior a 1000 ppm.

El agua es vital para la vida en la forma en que la conocemos. En el planeta existen grandes cantidades de agua, pero sólo un pequeño porcentaje de la misma es apta para consumo humano. El 97 % de los recursos hidráulicos mundiales existentes se encuentran en el mar y en los

océanos, el 3 % restante sería el agua que podría utilizar la población de la tierra, sin embargo, la realidad es que de esta pequeña cantidad, sólo un 0.39% está realmente disponible para satisfacer las necesidades mundiales del hombre (Medina, 2000). Entre estas se incluyen el agua utilizada para consumo humano directo, la agricultura y en usos industriales. La distribución de los recursos de agua dulce en el planeta es muy irregular, existiendo regiones donde es abundante y/o accesible, y otras donde es nula, escasa o difícil de obtener, dando lugar a las áreas desérticas o semidesérticas (CONAGUA, 2006). También hay que considerar que en algunas regiones es escasa porque su calidad es inapropiada para el desarrollo. El abastecimiento de agua para uso y consumo humano, así como para uso agrícola e industrial es importante para el desarrollo de comunidades en cualquier país, sin embargo la escasa disponibilidad del recurso hídrico cada día es más evidente y conforme las necesidades de agua se incrementan, aumentan los conflictos entre los países o comunidades en donde dicho recurso es escaso, y debido al elevado consumo actual de los recursos existentes, tanto superficiales como subterráneos, se reducen y comprometen las reservas disponibles para las generaciones futuras (González y Dévora, 2008).

Una opción importante para incrementar la disponibilidad de agua en cuencas con stress hídrico es la desalinización de aguas marinas y salobres, la cual es una alternativa viable en casos donde se cuente con litoral a una distancia apropiada; la desalinización, en el sentido amplio, consiste en el proceso de separación de sales, del agua en que se encuentran disueltas (VALERO, 2001).

La desalación de agua marinas y salobres se presenta actualmente como la principal apuesta tecnológica para satisfacer la demanda de agua de las regiones costeras (Morton, 1998). Además con el aumento de población y con el aumento de demanda de agua la tecnología de desalación ha tomado un gran repunte como alternativa de solución a los problemas de desabasto de agua, (Wangnick, 2000)

3 Capítulo 2

3.1 Fundamentos importantes de la desalinización del agua

La desalinización, también conocida como desalación, es el proceso por el cual el agua de mar, que contiene 35 000 ppm (partes por millón) del total de sólidos disueltos (T.S.D.), y las aguas salobres, que contienen de 5 000 a 10 000 ppm del T.S.D., se convierten en agua apta para el consumo del hombre, uso doméstico y utilización industrial. Sería conveniente definir qué se entiende por agua dulce y por agua potable. Los estándares para el agua dulce pueden variar en cada país; sin embargo, el estándar empleado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) la define como una solución acuosa que contiene menos de 500 ppm del T.S.D. La definición de agua potable sería básicamente la misma, agregándole las siguientes cualidades: inodora, incolora, insípida y finalmente libre de bacterias contaminantes. El grado de salinidad puede variar en los diferentes océanos, pero las proporciones relativas de los principales constituyentes son las mismas.

Sólidos disueltos totales (SDT). Es una medida de la cantidad de materia disuelta en el agua. El origen puede ser múltiple, orgánico e inorgánico, tanto en aguas subterráneas como superficiales, en los usos industriales la concentración elevada de sólidos disueltos puede ser por la interferencia en procesos de fabricación. (Moreno, 2012, pág. 27). Los (SDT) representa “las sales inorgánicas (calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que están disueltas en el agua” (OMS, 2003) (Cabezas, 2013, pág. 35).

En la (tabla 1) se muestra la composición química del agua de mar, y en la (tabla 2), la diferencia de salinidad en los distintos mares y océanos.

Sal	Cantidad de sales en 1 litro de agua	
	Gramos (g)	Total de sales (%)
Cloruro de sodio	27,213	77,758
Cloruro de magnesio	3,807	10,878
Sulfato de magnesio	1,658	4,737
Sulfato de calcio	1,26	3,6
Sulfato de potasio	0,863	2,465
Carbonato de calcio y trazas de otras sales	0,126	0,345
Bromuro de litio	0,076	0,217
Total	35,003	100,00

Tabla 1. Composición química promedio del agua de mar

Mar (océano)	Contenido de sales (%)
Océano Atlántico	3,6
Océano Pacífico	3,36
Océano Índico	3,38
Mar Mediterráneo	3,94
Mar Adriático	3,0
Mar de Japón	3,4
Mar del Norte	3,28
Mar Rojo	4,3
Mar Blanco	3,3
Mar de Mármara	2,5
Mar Negro	1,7
Mar Caspio	1,3
Mar Báltico	0,75

Tabla 2. Contenido de sales en los diferentes océanos y mares

Cuando se desaliniza el agua con el fin de utilizarla para beber, la sal contenida en el agua resultante del proceso no debe exceder de 500 ppm; cuando el abastecimiento de agua de esta calidad es insuficiente, la desalinización constituye una alternativa del transporte de agua potable desde grandes distancias mediante conducciones o vehículos cisterna.

3.1.1 Calidad de aguas en función de su salinidad

El contenido de sólidos disueltos totales (SDT) representa “las sales inorgánicas (calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que están disueltas en el agua” (OMS., 2007).

De acuerdo a la salinidad (o contenido de SDT) las aguas pueden clasificarse en dulces, salobres, salinas, marinas y salmueras (Tabla N° 3). La importancia de conocer este parámetro radica en que el contenido de SDT va a condicionar el consumo de energía necesario para la desalinización (Fariñas, 2005). Además va a determinar el contenido de SDT en el efluente de rechazo que habrá que tratar previo a su disposición.

DENOMINACION	CONCENTRACION EN SALES (mg/l)
Dulces	< 1.000
Salobres	Baja 1.000 – 2.000 Media 2.000 – 5.000 Alta 5.000 – 10.000
Salinas	10.000 – 30.000
Marinas	30.000 – 50.000
Salmueras	50.000 – 200.000

(Fuente: Fariñas M., 2003)

Tabla 3. Caracterización del agua en función de su salinidad

Medina (2000) menciona que la desalinización consiste en un proceso de separación de sales disueltas de aguas salobres o de mar para convertirlas en aguas adecuadas para consumo humano, industrial o de riego. Existen diversas tecnologías desarrolladas en la actualidad para desalinizar el agua de mar y aunque tienen características distintas de acuerdo con el tipo de energía, diseño y producción que requiere cada una, todas tienen el mismo objetivo: reducir la concentración de sales disueltas del agua de mar; ello permite distinguir entre los procesos que separan el agua de las sales y los que realmente efectúan la separación de las sales de la solución.

Clase de separación	Energía utilizada	Proceso	Sistema
Agua de sales	Térmica	Evaporación	Destilación solar Destilación súbita <i>flash</i> Destilación multiefecto Termocompresión de vapor
	Frío	Cristalización	Formación de hidratos Congelación
	Mecánica	Evaporación Filtración	Compresión mecánica de vapor Ósmosis inversa
Sales del agua	Eléctrica Química	Filtración selectiva Intercambio	Electrodialisis Intercambio iónico

Fuente: Lattemann y Hoepner (2007).

Tabla 4. Clasificación de los procesos de desalinización

La disponibilidad de agua no implica que su calidad permita el uso. La contaminación natural y por el hombre han provocado que sea necesario tratarla antes de destinarla a consumo humano, agrícola o industrial. La calidad del agua varía de acuerdo con la región y el tipo de subsuelo de los contaminantes.

Agua	SDT (mg/L)
Ultrapura	0.03
Pura	0.30
Desionizada	3.00
Potable	< 1 000.00
Salobre	1 000.00 - 10 000.00
Salina	10 000.00 - 30 000.00
Marina	30 000.00 - 50 000.00

Fuente: Valero (2001).

Tabla 5. Salinidad de diferentes tipos de aguas

Debido a la gran importancia que ha despertado el proceso de la desalinización de agua de mar para poder hacerla apta para consumo humano y como una solución al desabasto de agua en el mundo, existen varias estrategias que estudian este proceso.

3.1.2 Agua salobre

El agua salobre es aquella que tiene más sales disueltas que el agua dulce, pero menos que el agua de mar. Técnicamente, se considera agua salobre la que posee entre 0.5 y 30 gramos de sal por litro, expresados más frecuentemente como de 0.6 a 30 partes por mil.

Algunos mares, como el Mediterráneo, son más salados que los océanos, y otros, como el mar del Norte, son menos salados. En las zonas de precipitaciones abundantes y climas oceánicos la composición depende más del clima y la vegetación. En las zonas desérticas o de escasas precipitaciones atmosféricas, la roca madre tiene una gran influencia en la composición del agua, añadiéndose el hecho de que es común que en zonas sedimentarias calizas también haya rocas de sal gema sedimentaria. Hay zonas en las que la evaporación es muy importante y se acumula gran cantidad de sal, siendo la concentración bastante superior a la del mar; es decir, mayor de 75 g/L (como en el mar Muerto, que es de 276 g/L), por lo cual estas “aguas viejas” de origen dulce transformadas en hipersalinas son llamadas aguas “atalasohalinas”, y, por supuesto, no son consideradas salobres ni mucho menos dulces.

El agua salobre es típica de los estuarios de todo el planeta y resulta de la mezcla del agua de las lluvias, reunidas generalmente en cada río correspondiente, con el agua del mar. Es más importante su aportación en grandes ríos tropicales, como el Mekong, el Congo o el Amazonas, y puede hallarse en mar abierto, no muy lejos de las desembocaduras de ríos como estos. También se encuentra agua salobre con sal de origen fósil en zonas interiores, en ciertos acuíferos asociados con rocas salinas. (Carrier, 1980)

3.1.2.1 Diferentes grados de salinidad en el agua

El término “agua salobre” cubre un gran rango de salinidad y no es una condición definida con precisión. Es característico del agua salobre que su salinidad pueda variar considerablemente a lo largo del tiempo y del lugar; por ejemplo, con las estaciones del año y las precipitaciones que estas conllevan. Varias de las categorías aquí reseñadas no son agua salobre, excepto en áreas locales, donde reciben aportaciones tan importantes como para variar sus características. Se obtiene agua salobre a partir de la mezcla de agua dulce y agua marina.

3.1.2.1.1 Agua oceánica:

Es la más abundante y se toma como referencia, ya que ocupa una extensión considerable. La concentración de sales minerales disueltas que contiene es de 35 ‰ (3.5 %) como media, entre las que predomina el cloruro de sodio. El océano contiene un 97.25 % del total de agua que forma la hidrosfera.

3.1.2.1.2 Agua de los mares:

La composición y concentración suele ser bastante constante, pero depende del tamaño del mar, lo comunicado que esté con océanos abiertos y su situación geográfica. En la superficie y en las zonas circumpolares y polares es variable, debido a una mayor o menor evaporación, que varía la concentración de sales. También, algunos mares reciben mayor aportación de agua dulce atmosférica en forma de nieve o hielo. Las zonas tropicales pueden estar muy influidas por los aportes de los grandes ríos. Las aguas de los mares son menos uniformes en la cantidad y proporción de sales en comparación con las aguas oceánicas. El agua de mar tiene una salinidad del 35‰ (35 g/kg). Algunos de los elementos están en proporción constante, como son el cloro y el sodio, y otros en proporción variable, aunque influyen menos en los seres vivos. El cloro y el sodio son importantes para explicar las adaptaciones de los animales a ese medio y tienen gran influencia en la presión osmótica.

3.1.2.1.3 Aguas salobres costeras:

Son similares a las oceánicas, pero con menor salinidad. Las aguas salobres son intermedias en salinidad entre el agua oceánica y las aguas dulces continentales. Su salinidad suele estar alrededor de 17 g/L en sodio y 0.2 g/L en cloro.

3.1.2.1.4 Aguas salobres continentales:

Tienen algunos elementos de proporción variable que son muy importantes a nivel local; algunos son nutrientes, como nitratos y fosfatos, que varían mucho de un lugar a otro. También son importantes los carbonatos, los sulfatos, las sales de calcio, etc. Su importancia radica en que explican la distribución y los ciclos de los organismos.

3.1.2.1.5 Aguas dulces continentales (incluyendo el agua de lluvia):

Tienen una composición heterogénea. Su concentración en sales es muy inferior a la oceánica, por lo que se suele medir en mg/kg o mg/L. Las aguas dulces se caracterizan por tener menos de 0.2 g/kg (o sea, menos de 200 mg/kg) en clorinidad. En los ríos hay de 5 a 12 mg/L en clorinidad y de 60 a 180 mg/L en sales.

3.1.3 Salmuera

En principio, es la componente de las aguas de rechazo debida a las sustancias aportadas por el agua de alimentación es la menos preocupante, sobre todo cuando se vierte al mismo medio de donde se extrae el agua (como sucede cuando el agua se toma del mar) ya que no se añade ninguna carga contaminante al sistema. Sin embargo, señala que se debe de tener en cuenta (Ruiz Mateo, (2010)):

- i. Cuando el agua se toma de pozos profundos, además de estar exenta de oxígeno, suele tener concentraciones elevadas de sulfuro de hidrógeno que resulta tóxico para los organismos acuáticos. Afortunadamente ambos problemas tienen la misma sencilla solución: un tratamiento de aireación.
- ii. A veces estas aguas profundas presentan también niveles de radiactividad superiores a los límites admitidos para aguas superficiales, problema que se agrava por los altos

factores de reconcentración que tienen las plantas RO con aguas salobres. Algo similar sucede con los fluoruros y con algunos metales.

- iii. Cuando el agua bruta se toma del mar y el efluente se vierte al mismo medio, la salinidad habrá aumentado en un 10% si se trata de plantas térmicas y en un 70% si es una planta de ósmosis inversa ((Einav, (2002)).

3.1.3.1 *Naturaleza de la salmuera*

La salmuera de rechazo de una desaladora no contiene residuos, como en el caso de otros procesos industriales. La salmuera contiene los mismos iones y componentes que se extrajeron del mar, salvo la pequeña proporción que atraviesa las membranas y se incorpora al agua dulce producida (en el orden de un 1% del contenido existente en el agua de mar de alimentación). Sin embargo, esos iones están concentrados en un volumen de aproximadamente el 50% del extraído del mar. En el proceso de desalación se usan algunos aditivos para ayudar a la filtración o a la limpieza de las membranas que pueden estar presentes en el vertido de salmuera en cantidades prácticamente imposibles de detectar. Como es evidente, todos esos productos son potables (nos bebemos el agua producida con la que esos productos están en contacto) y, además, son los mismos productos que utilizamos en el tratamiento de aguas naturales superficiales o subterráneas. Por tanto, la salmuera es agua de mar concentrada y no tiene efectos misteriosos sobre el medio ambiente marino, salvo, evidentemente, los que se deducen de su concentración en sales que es el doble de la del agua de mar (aproximadamente).

3.1.3.2 *¿La salmuera que se devuelve al mar tiene algún impacto negativo?*

Es una pregunta frecuente pero se debe destacar que no existe un impacto ambiental negativo para el entorno. La salmuera se devuelve al mar bajo estrictas condiciones medioambientales y los posibles problemas se minimizan. Se evitan concentraciones de sal nocivas para el

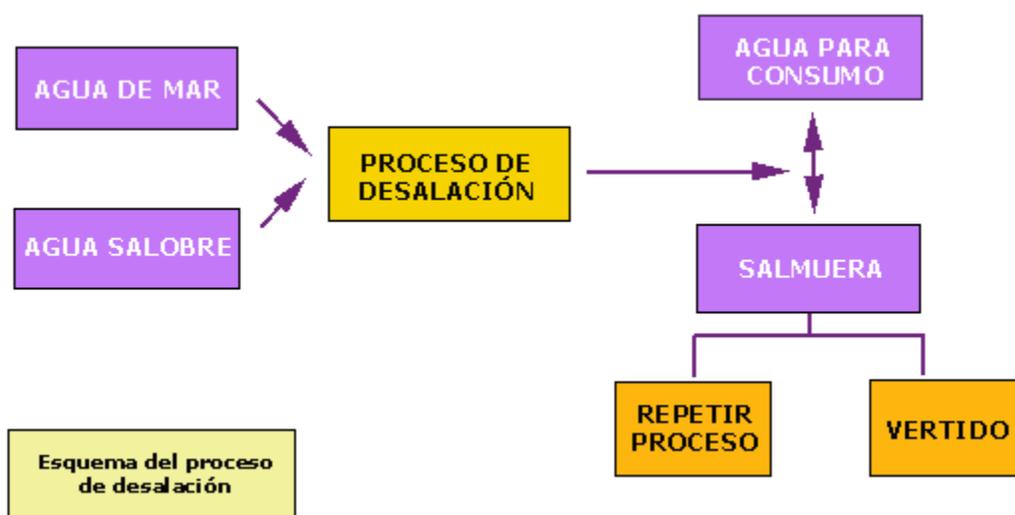
ecosistema a través de emisarios submarinos o diluyendo la salmuera con agua de mar en unos depósitos antes de devolverlo al mar.

La desaladora de Jávea (Alicante, España) es un buen ejemplo de gestión de vertido de salmuera: fue la primera planta desaladora por ósmosis inversa del mundo que diluye la salmuera de rechazo para minimizar el impacto ambiental.

4 Capítulo 3

4.1 Tecnología de la desalinización

El sistema de desalinización consiste en alimentar agua salobre o marina a una planta desaladora, que tiene como función acondicionar y eliminar sales al agua para obtener un producto, y un rechazo o salmuera. La desalinización de agua salobre y de mar se realiza con dos sistemas principalmente: los que utilizan el uso de combustibles fósiles, como los sistemas térmicos, y por otro lado, los que utilizan membranas y alta presión.



Fuente: (J.A. López Geta, 2000) Club del Agua, julio 2000

(http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/pdfs/artycn21.pdf)

Ilustración 1. Esquema de un sistema de desalinización.

4.1.1 Sistemas térmicos

Los procesos de destilación necesitan calor para provocar el cambio de estado del líquido a vapor, que prácticamente es independiente de la salinidad que tenga el agua y es el proceso en el cual el agua de mar se calienta hasta evaporarla; después el vapor se condensa formando agua dulce y el agua sobrante se desecha como salmuera concentrada (Porta *et al.*, 2002; Hiriart, 2007). Entre los principales sistemas de destilación se cuentan la destilación por compresión mecánica de vapor (MVC), destilación relámpago *flash* multietapa (MSF) y destilación multiefecto (MED). Las instalaciones de destilación pueden producir agua en un rango de entre 1 y 50 miligramos de sólidos disueltos (TDS) por litro (WHO, 2007).

4.1.1.1 Destilación por compresión mecánica de vapor (MVC)

Los sistemas MVC funcionan comprimiendo vapor de agua, lo que causa condensación sobre una superficie de transferencia de calor (un tubo), lo cual permite al calor de la condensación ser transferido a la salmuera del otro lado de la superficie, resultando en la vaporización de ésta. El compresor es el requerimiento de energía principal. El compresor aumenta la presión en el lado del vapor y baja la presión del lado del agua salada para bajar su temperatura de ebullición (Cipollina, 2005).

En la (ilustración 2) se tiene un esquema del funcionamiento de un equipo que desaliniza agua marina por medio de compresión de vapor, donde se utiliza un elemento calefactor en una caldera y se comprime el vapor para obtener agua con una disminución considerable de sales.

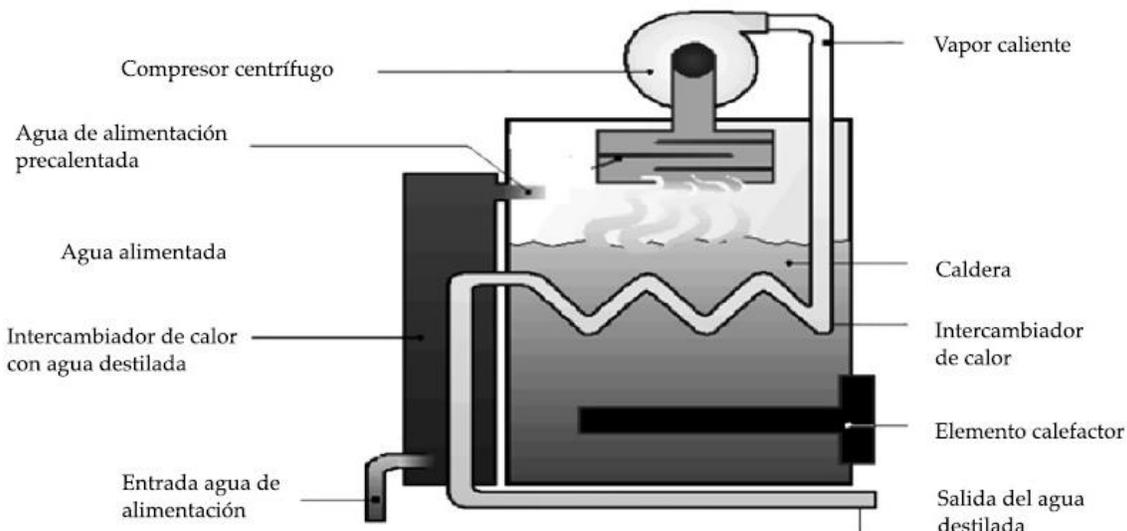


Figura 2. Esquema de destilación por compresión mecánica de vapor. Fuente: Norland Int'l (2004).

Ilustración 2. Esquema de destilación por compresión mecánica de vapor.

4.1.1.2 Destilación flash multietapa (MSF)

Las plantas MSF constituyen una gran parte de la capacidad de desalinización mundial. En este proceso, el agua de mar es calentada en un tanque por medio de un serpentín o tubos en paralelo que contienen algún fluido caliente; después se pasa a otro tanque, llamado etapa, donde la presión reducida permite que el agua hierva. El agua vaporizada es enfriada y condensada para obtener el producto. Khawaji (2008) menciona que el calor latente liberado en la condensación del vapor es utilizado para calentar la salmuera en otra etapa; el producto destilado se colecta en cascada, en cada uno de los tanques colocados en paralelo con la salmuera y se bombea a un tanque de almacenamiento. La tasa de producción depende de la temperatura del agua salada y del número de etapas que se lleven a cabo. El agua desalinizada en este proceso contiene por lo general de 2 a 10 ppm de sólidos disueltos, por lo tanto es remineralizada por potabilización.

Las plantas MSF se caracterizan por requerir altos volúmenes y flujo de agua disponible para tratar problemas de corrosión y mineralización en la planta, y altas tasas de uso de químicos en el tratamiento del agua (Valero, 2001).

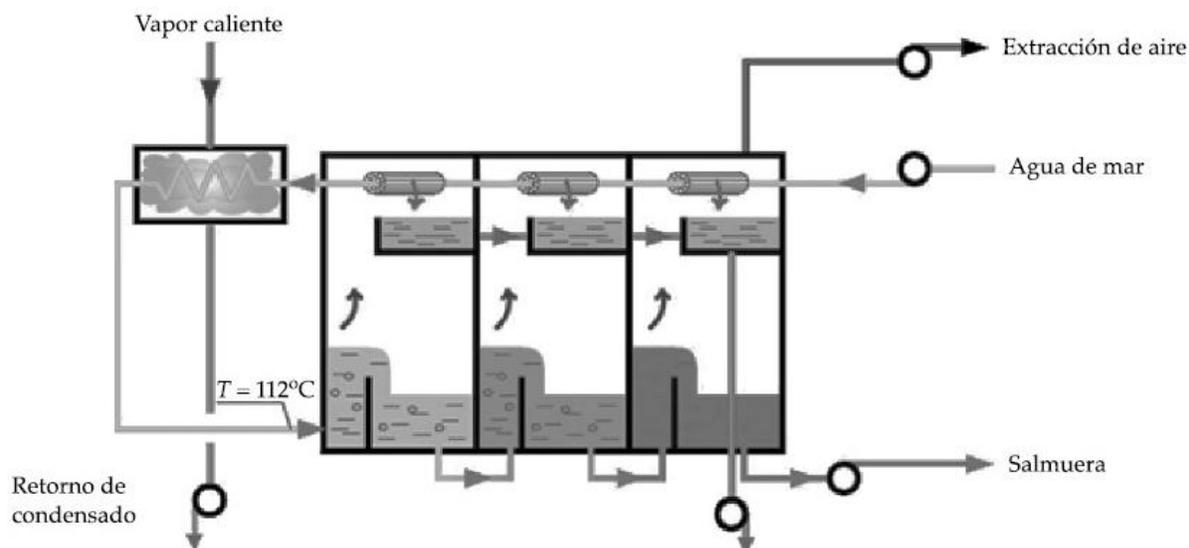


Figura 3. Procesos de desalinización mediante MSF. Fuente: Veolia (2011).

Ilustración 3. Proceso de desalinización mediante MSF.

4.1.1.3 Destilación multiefecto (MED)

Las plantas MED se configuran con base en tubos verticales u horizontales. El vapor se condensa en un lado de un tubo, lo que ocasiona la evaporación de agua salada en el otro lado. En la configuración más común de este proceso, el agua salina, al evaporarse, es distribuida sobre la superficie exterior de tubos calentados. Dentro de cada efecto MED se rocía agua marina fresca sobre un grupo de tubos de intercambio térmico mientras el vapor que fluye a través de los tubos se condensa, volviéndose agua pura. Fuera de los tubos, la delgada película de agua marina hierve a medida que absorbe el calor del vapor. El vapor resultante pasa a través de eliminadores de rocío para atrapar gotas de salmuera remanentes antes de que el vapor se introduzca en los tubos para el próximo efecto. El proceso se repite a través de toda la planta. También están

disponibles configuraciones MED alternativas que emplean tubos verticales o superficies de transferencia de calor planas (WHO, 2007).

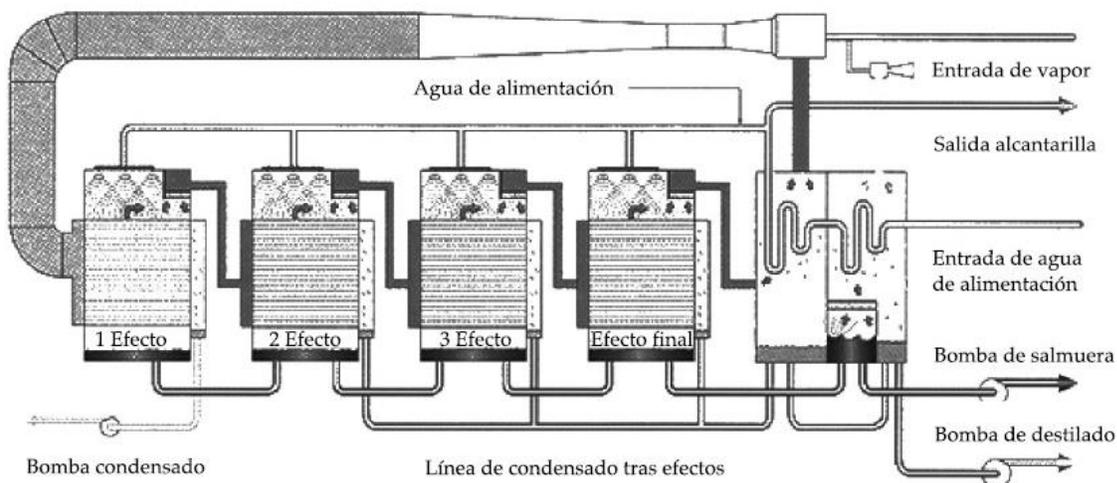


Figura 4. Procesos de destilación multiefecto (MED). Fuente: Cetenma (2008).

Ilustración 4. Proceso de destilación multiefecto (MED)

La presión se reduce de forma secuencial en cada efecto a medida que la temperatura se reduce; se proporciona más calor en cada etapa para mejorar el desempeño del proceso. Este tipo de instalaciones cubre grandes superficies.

4.1.1.4 Desalinización solar

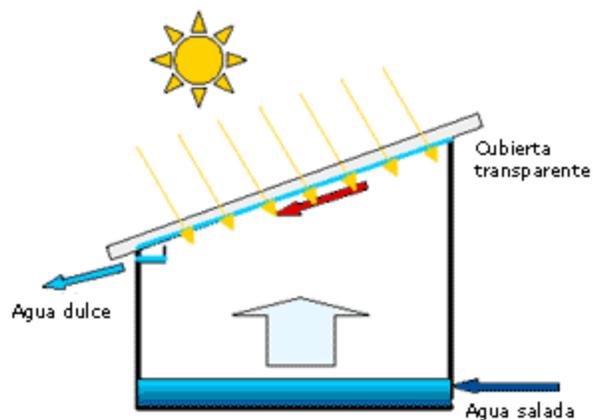
En México, según reporta Dévora (2007), hay 436 plantas desalinizadoras ubicadas en 320 lugares, con capacidad instalada de 311 377 m³/d, pero del total de plantas instaladas, sólo 13 son por el método de destilación y únicamente cinco utilizan energía solar como fuente energética. De las plantas desalinizadoras que utilizan energía solar, sólo tres utilizan el método de destilación y energía solar simultáneamente, y siete emplean energía solar aplicada a otros procesos de desalación.

El calentamiento de agua con energía solar es una alternativa viable y probada en México y el resto del mundo (Conae, 2007), donde el dispositivo para destilación por medio de placa plana es el más utilizado en México cuando se pretende utilizar al Sol como fuente de calentamiento.

Por otro lado, la desalinización solar en el país se utiliza desde 1970 en la Paz, Baja California Sur. Esta planta fue un proyecto entre Alemania y México, que utilizaba energía solar acoplada a un sistema MSF, utilizando colectores de concentración lisos y parabólicos. Posteriormente, a principios de 1980, se instaló otra planta en Las Barrancas, localidad en el mismo estado. Este proyecto se implementó como un sistema integral, que incluyó agua desalada para varios usos; pero al terminar el convenio, las dos plantas desalinizadoras quedaron en el abandono (Bermúdez y Thomson, 2008).

En esa misma década se realizaron investigaciones y se construyeron diferentes tipos de colectores solares de concentración para agricultura y para abastecer a la población.

Hoy día existen diferentes tipos de sistemas solares para desalación en la nación; la mayor parte se encuentran en el estado de Baja California, donde las condiciones climáticas y la energía solar presente durante todo el año permiten que se instalen desde celdas fotovoltaicas para acoplarse a sistemas de ósmosis inversa hasta sistemas con colectores de concentración para ensamblarse a desaladoras de tipo MED y MSF (Bermúdez y Thomson, 2008), o incluso para la agricultura (Fernández y Chargoy, 2003), aplicados para el aprovechamiento óptimo del agua, o en lugares donde el líquido no es abundante o no está en condiciones aptas para el cultivo.



Esquema de un colector solar para destilación

Fuente: La desalación como alternativa al PHN.2001

Ilustración 5. Desalinización solar

4.1.2 Sistemas por membranas

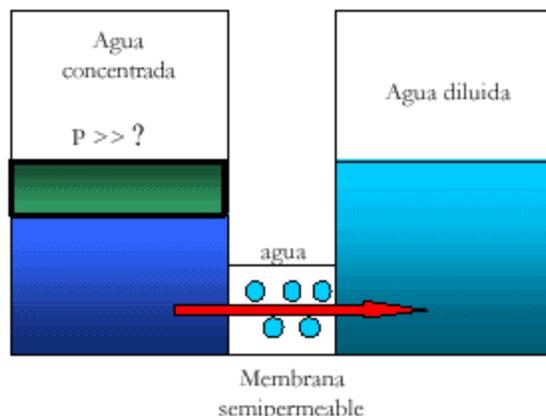
La desalinización de agua de mar por medio de membranas es un proceso que separa el agua salina en dos vertientes: una corriente de agua potable con baja concentración de sales disueltas y una corriente de salmuera concentrada. Los sistemas más utilizados son ósmosis inversa y electrodiálisis.

4.1.2.1 *Osmosis inversa*

Este proceso aplica presión para superar la presión osmótica del agua a tratar. El proceso de ósmosis inversa es quizá el método más sencillo para desalar y el que parece acercarse a los mejores rendimientos energéticos. El sistema toma su nombre por realizarse el paso de las soluciones en forma contraria a los procesos osmóticos normales. Es decir, las soluciones menos concentradas se desplazan, por diferencia de energía potencial, hacia las más concentradas, a través de una membrana semipermeable, con la necesidad de aplicar una fuerza externa para lograr la separación del agua de las sales (Arreguín, 2000).

Por tanto, cuanto mayor sea la salinidad del agua, mayor será su presión osmótica a superar. Consta de obra de toma para captación de agua de mar, seguido de un sistema de pretratamiento físico y químico, consistente en filtros de arena y filtros de carbón activado (físico); dosificación (química) para regular el pH del agua de alimentación, y adición de anticrustantes para evitar depósitos de sal en las membranas; así como bastidores de membranas de ósmosis inversa para eliminar las sales. Desalinizada el agua, se conecta un tren de postratamiento para desinfectar el agua, usando de manera individual y de acuerdo con el uso final del agua producto, lámparas UV, cloración y ozonación, lo que permite asegurar la calidad del agua en líneas de distribución y almacenamiento. Debido al arreglo en serie o paralelo de las membranas, el espacio ocupado por la planta es pequeño, lo cual es una ventaja respecto a los sistemas térmicos.

Ilustración 6. Desalinización por osmosis inversa



Proceso de ósmosis inversa

Fuente: La desalación como alternativa al PHN.2001

4.1.2.2 Componentes del diseño de una planta de desalinización por ósmosis inversa.

La Ósmosis inversa (OI) es un proceso en el que se obtiene agua dulce del agua salada. La ósmosis natural es un fenómeno que consiste en que, si hay una membrana semipermeable separando dos soluciones con el mismo disolvente, el disolvente pasa a través de ella, pero no las sales disueltas, desde el lado donde la concentración de sales es más baja hacia la más alta, hasta que a ambos lados de la membrana las soluciones tienen la misma concentración. Este proceso se realiza sin aporte de energía exterior, y se genera mediante la que se llama presión osmótica.

La ósmosis inversa consiste en hacer pasar por la membrana semipermeable el disolvente (en este caso agua) desde el lado donde está la solución más concentrada (el agua de mar, con sales disueltas), hacia el lado contrario, sin que pasen las sales. En este caso se requiere energía, en forma de presión, que será ligeramente superior a la presión osmótica que haría pasar el solvente de baja concentración hacia el lado de la alta concentración. La presión necesaria para conseguir la ósmosis inversa depende de la cantidad de sales disueltas y del grado de desalinización que se quiera obtener. Del empleo de energía en el proceso resulta un aumento de la entropía.

El mar es una fuente virtualmente ilimitada de agua salada. Una planta de ósmosis inversa necesita procesar un volumen de agua de mar de hasta tres veces mayor que la cantidad total de agua desalinizada que se obtendrá al final. Por eso el diseño de los pozos o sistema de captación debe considerar este factor para su capacidad.

Está en fase de investigación el uso de una lámina de grafeno con poros de 1,8 nm para sustituir las membranas en el proceso de ósmosis invertida para la desalinización del agua. Según las investigaciones actuales se obtendrían eficiencias mucho mayores que con las membranas actuales, y se tendrían requerimientos menores de energía. En el estado actual, el inconveniente es el costo de las membranas de grafeno, pero se espera que en el futuro estos costos podrán ser reducidos.

4.1.2.2.1 Proceso de producción

Generalmente se emplea un gran depósito o balsa que se llena por gravedad al nivel del mar, previo un filtrado grosero. Se transporta el agua de la balsa mediante las bombas de alimentación al sistema de desalinización. A la entrada de las bombas de alimentación llega un suplemento de productos químicos mediante bombas dosificadoras. Así se prepara el agua para pasar cuatro tipos de filtros que retienen partículas mayores de cuatro micras. El paso principal de la producción de agua es la separación del H₂O de la mezcla de sales y minerales presente en el agua del mar. Este paso se realiza en la etapa de ósmosis inversa consiguiendo que las sales no atraviesen las membranas de los módulos de OI. Previamente ha de conseguirse las partículas de diatomeas y microalgas no lleguen a las membranas y para eso existen tres pasos previos de filtración por arena antes del último paso de micro filtración usando cartuchos de fibra sintética. El éxito de filtración también depende de la apropiada introducción de coagulantes. De acuerdo a la calidad de filtración se genera el ciclo de cambio de las membranas entre 2 y 5 años. Los

dispersantes químicos introducidos antes de la micro filtración previenen la precipitación de minerales dentro de las membranas.

Como todos los aspectos del proceso están automatizados, el trabajo de los operadores es la supervisión y el mantenimiento.

4.1.2.2.2 Regulación de alta presión y recuperación de energía

La salmuera rechazada es un 55 % del agua bruta (aunque depende de la tecnología de desalinización empleada). Mientras que el 45 % del agua obtenida sale a presión atmosférica, debe asegurarse una contrapresión regulada en el flujo de rechazo. Este flujo de rechazo siempre contiene algo así como el 55 % (100 % - % ganada) de la energía de presión proporcionada por las bombas y es muy conveniente la recuperación de esta energía para obtener un rendimiento mayor. Una parte de la energía recuperada puede volver al mismo ciclo de desalinización y recuperación más de una vez.

Mientras que la planta está en el modo de producción se controla la presión de salida por una válvula de regulación. Se usan convertidores 'Pressure Exchanger' y con ellos en el intercambio de presión se puede recuperar hasta el 95 % de la energía del flujo de rechazo directamente por medio de bombeo usando desplazamiento positivo. Esa bomba de recuperación de energía aumenta el flujo de más agua bruta a la entrada de las membranas. La planta usa las unidades 'Pressure Exchanger' cerca de cada grupo de tubos de elementos de ósmosis inversa.

4.1.2.2.3 Calidad del agua producida

El agua osmotizada o el permeado de los módulos de ósmosis inversa debe ser acondicionada para cumplir con ciertas características de alta calidad, ya que, el agua producida tiene un pH ácido y un bajo contenido de carbonatos, lo que la convierte en un producto

altamente corrosivo. Esto exige su preparación antes de su distribución y consumo. El pH se ajusta con carbonato de calcio a un valor de 7,7. Adicionalmente, si así lo requieren las normas municipales para uso del agua potable, se agrega también fluoruro de sodio e hipoclorito.

4.1.2.2.4 Energía eléctrica

Los requerimientos energéticos de la desalinización varían en función de la tecnología empleada, aunque hay una tendencia hacia su reducción, gracias a los avances tecnológicos.

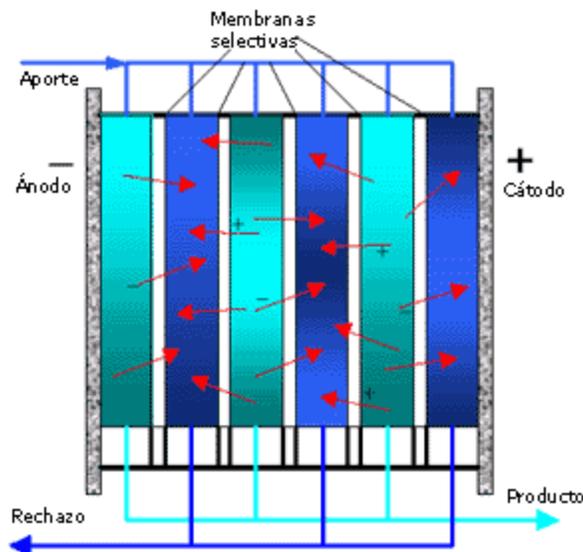
Empleando sistemas de ósmosis inversa y contando que el líquido producto debe ser bombeado a los lugares de destino, el gasto energético es de entre 3 y 4 kWh/m³.⁴ Se prevé que, con una mejora de la tecnología, pueda obtenerse agua desalinizada con un gasto energético de unos 2,9 kWh/m³ hacia el año 2010.

4.1.2.2.5 Almacenamiento y distribución del agua producida

El agua desalinizada pasará por bombeo al depósito de almacenamiento de agua potable que puede estar encima de un cerro natural o a nivel del terreno, en cuyo caso se le dará la necesaria presión con bombas de caudal variable. Luego se reparte por la red de distribución local.

4.1.3 Electrodialisis

La tecnología de electrodialisis (ED) es un proceso de separación electroquímico, donde los iones son transferidos a través de membranas de intercambio iónico (figura 6), por medio de un campo de corriente continua (Belfort, 1984; Mani, 1991).



Proceso de electrodiálisis

Fuente: La desalación como alternativa al PHN.2001

Ilustración 7. Esquema general de una planta de electrodiálisis

En este proceso, las sales disueltas ionizadas atraviesan las membranas y de esta forma se eliminan las partículas cargadas eléctricamente; no produce una total eliminación de sales, sino que en la práctica, la reducción de salinidad es del orden del 40%. Para efectuar una determinada reducción se dispone de una cascada de células de electrodiálisis. Este proceso puede competir de forma ventajosa con la destilación para aguas de baja salinidad (salobres), pero no con el agua marina. La explicación reside en que mientras en los procesos de destilación el costo de la operación no depende de la salinidad del agua de partida, en la electrodiálisis el consumo de energía es proporcional al contenido de sólidos disueltos. No se tratan por electrodiálisis aguas con más 5 000 de ppm. Otra desventaja es que las membranas son caras y están sometidas a polarización e incrustación si la intensidad de corriente es elevada. La presencia de materia orgánica, sílice disuelto y hierro en el agua de alimentación incrusta y reduce la vida de las membranas (Arreguín, 2000).

Por otra parte, Torrent (2011) menciona que la electrodiálisis, en su modalidad reversible (EDR), permite obtener elevadas recuperaciones de agua respecto a la ED, gracias a su cambio de polaridad, lo que permite la auto limpieza de los compartimentos de producto y rechazo, disminuyendo la polarización e incrustación.

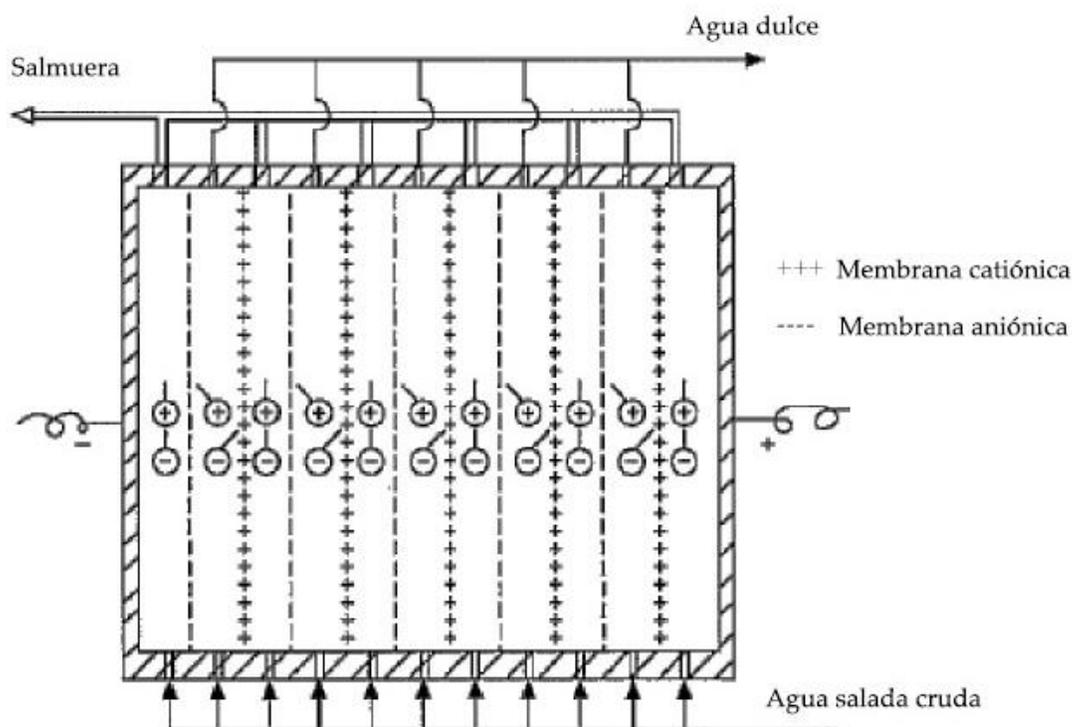


Ilustración 8. Esquema general de una planta de electrodiálisis reversible

4.2 Otros métodos para su desarrollo.

La desalinización puede realizarse por medio de diversos procedimientos, entre otros que se pueden citar:

4.2.1 Desalinización por congelación

Para la desalinización por congelación, se pulveriza agua de mar en una cámara refrigerada y a baja presión, con lo que se forman unos cristales de hielo sobre la salmuera. Estos cristales se separan y se lavan con agua normal. Y así se obtiene el agua dulce.

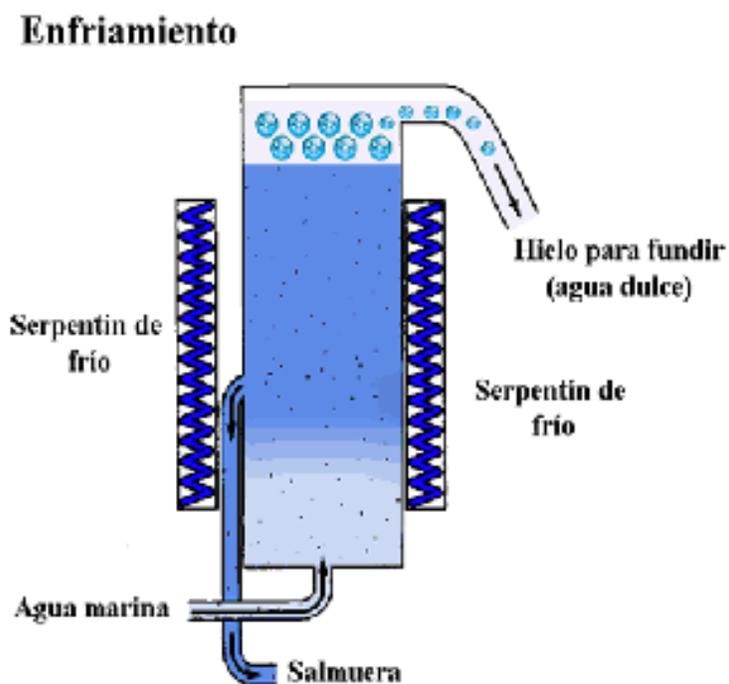


Ilustración 9. Desalinización por congelación

4.2.2 Desalinización mediante evaporación relámpago

En el proceso de desalinización por evaporación relámpago, en inglés *Flash Evaporation*, el agua es introducida en forma de gotas finas en una cámara a presión baja, por debajo de la presión de saturación. Parte de estas gotas de agua se convierten inmediatamente en vapor, que son posteriormente condensadas, obteniendo agua desalinizada. El agua residual se introduce en otra cámara a presiones más bajas que la primera y mediante el mismo proceso de calentamiento, pulverización y evaporación relámpago se obtiene más agua desalinizada. Este proceso se repetirá, hasta que se alcancen los valores de desalinización deseados. Estas plantas pueden contar más de 24 etapas de desalinización relámpago. A este proceso se le conoce como MSF (evaporación multietapa).

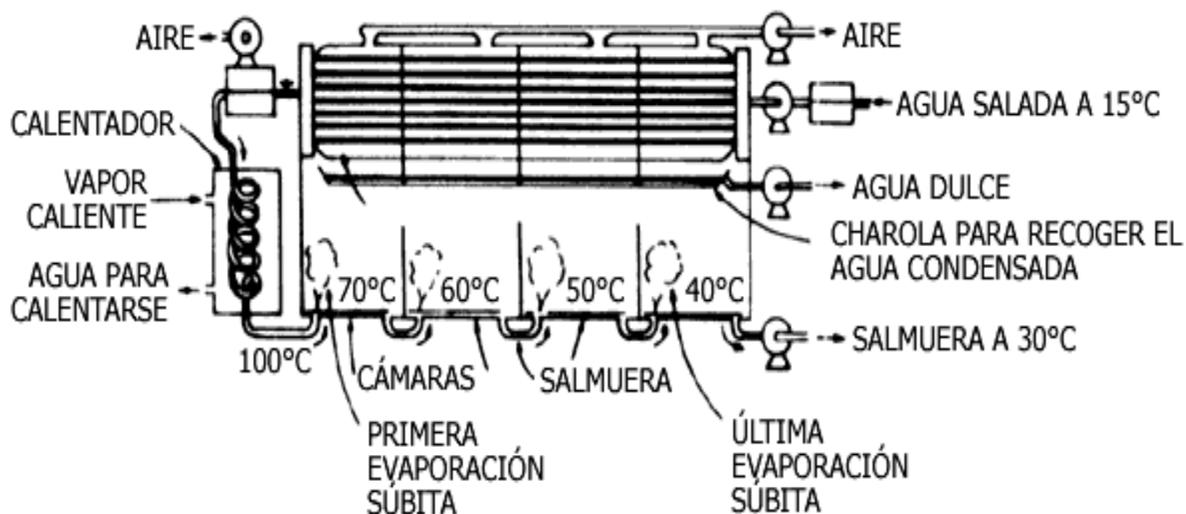


Ilustración 10. Desalinización mediante evaporación relámpago

4.2.3 Desalinización mediante formación de hidratos

Es otro método basado en el principio de la cristalización, que consiste en obtener, mediante la adición de hidrocarburos a la solución salina, unos hidratos complejos en forma cristalina, con una relación molécula de hidrocarburo/molécula de agua del orden de 1/18. Al igual que el proceso de congelación, su rendimiento energético es mayor que los de destilación, pero conlleva una gran dificultad tecnológica a resolver en cuanto a la separación y el lavado de los cristales que impiden su aplicación industrial. La desalinización por formación de hidratos, no es utilizada a gran escala.

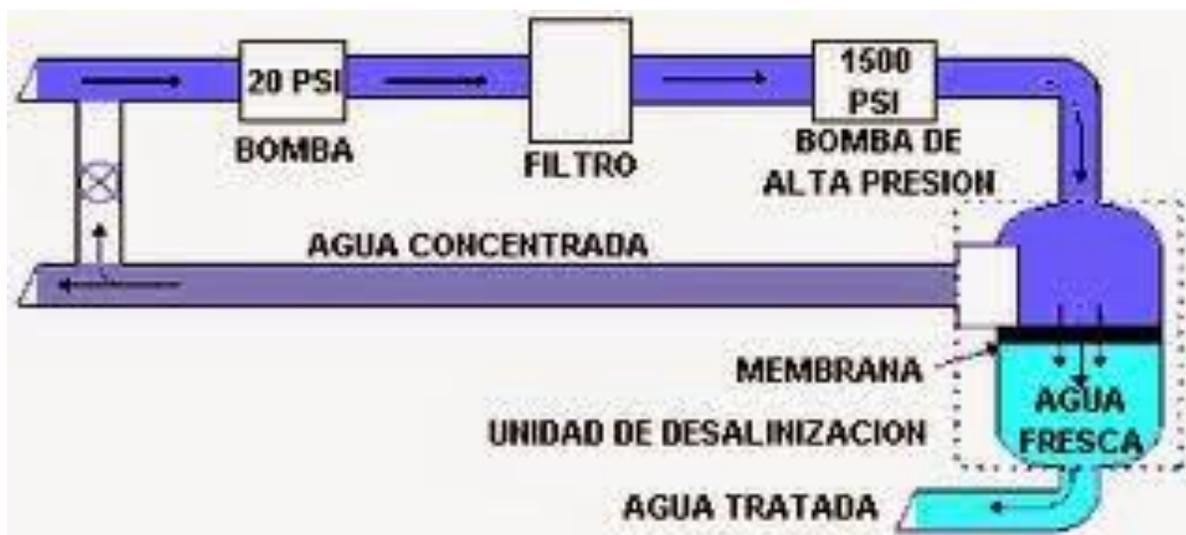


Ilustración 11. Desalinización mediante formación de hidratos

4.2.4 Comparación entre sistemas térmicos y de membranas

Los procesos de destilación requieren un cambio de estado en el cual existe una pérdida importante de energía; es por ello que es la tecnología con más tiempo de uso; sin embargo, han perdido importancia en la última década, siendo desplazados por los procesos de membrana, por ser más eficientes en la recuperación de agua producto y su bajo costo energético; este último supone el mayor de los costos de producción. Existen otros aspectos de estas tecnologías que a grandes rasgos deben ser conocidas, pues en situaciones concretas puede resultar ventajosa la elección de una frente a las otras.

La utilización de OI como fase previa al intercambio reduce de manera considerable la regeneración de resinas, prolongando su vida útil, a la vez que se rebajan de forma notable el costo de los reactivos químicos y se reducen los vertidos altamente contaminantes de los procesos de regeneración (Medina, 2000). El agua obtenida de los procesos de desalinización es perfectamente utilizable en la agricultura, turismo y consumo humano, pero exige una eliminación más selectiva de iones. Bajo este contexto, el objetivo es evaluar los procesos de desalinización, para determinar el más viable, mediante la comparación entre sistemas térmicos y de membranas, considerando el costo de producción, consumo energético, parámetros de operación y aplicación del agua producto.

5 Capítulo 4

5.1 Desarrollo tecnológico de la desalinización de agua

El sistema de eliminación de sales del mar o destilación se conoce desde la antigüedad, pero implicaba un consumo muy alto de energía lo cual lo hacía inviable a nivel económico. En fechas más recientes el desarrollo tecnológico permite la obtención de agua dulce (contenido en sales inferior a 500 ppm) a partir de agua de mar (contenido en sales del orden de 35.000 ppm) a un coste aún elevado pero progresivamente decreciente, que puede ser asumido por ciertos usos.

Se trata de una tecnología que viene siendo ampliamente utilizada desde hace años, tanto en la industria como en la agricultura o en el abastecimiento, aunque quizás solamente la relacione la mayoría de las personas con la desalación del agua de mar, y especialmente con los países desérticos del Golfo Pérsico. Y en efecto, al tener una gran escasez de agua y abundancia de petróleo y por tanto energía barata, hace más de 40 años que en ellos se instalaron y perfeccionaron algunas de las tecnologías de desalación que durante tres cuartas partes del siglo pasado se mantuvieron como las referencias tecnológicas del sector, pero que poco a poco han ido dando paso a otras tecnologías surgidas en el último cuarto del citado siglo y que se presentan como el gran reto del siglo XXI, que puede ayudar a resolver numerosos problemas de falta de agua. No debemos olvidar que ya en la actualidad se considera que al menos 60 millones de seres encaran serios problemas de escasez de agua y que según el Banco Mundial en los próximos 25 años dicha cifra puede alcanzar hasta los 200 millones y también que al menos en un 70% de los casos dichos problemas ocurren en países ribereños, y que por tanto tienen una fuente inagotable de agua como es el mar, si bien de una calidad que la hace inapropiada para la totalidad de los usos del ser humano. Por tanto si existe el depósito que puede suministrar el agua y existe también la tecnología capaz de convertir el agua de mar en agua potable o útil para

distintos usos, parece que es cuestión de tiempo el que esa tecnología pueda ser utilizada en mayor escala de lo que lo es actualmente. El proceso de desalación es como todo proceso industrial dependiente de la energía y es fundamentalmente la escasez de esta y su elevado precio la que hace que todavía no pueda ser utilizada la desalación para cubrir cualquier situación de escasez o falta de agua, puesto que los mayores costos de las tecnologías de desalación son precisamente los derivados del consumo de energía.

5.1.1 Industrias de desalinización

Actualmente, alrededor de 60 millones de personas beben agua desalinizada a nivel mundial. Si tenemos en cuenta las perspectivas de crecimiento esperado para el año 2030, la población podría llegar a 9.000 millones de habitantes y además gran parte se establecería en la franja costera. Esto hace necesario una producción de agua desalinizada de 140 – 160 millones de m³/día para hacer frente al incremento de la demanda.

Hoy en día, el principal problema de la desalación es el alto coste de producción debido al consumo energético necesario, pero éste cada vez es menor.

Según datos de la Asociación Internacional de Desalación (IDA), del año 2000, en el mundo existen 13.600 desaladoras, con una capacidad de producción de 26 Mm³ /día, y distribuidas entre 120 países. España es el quinto país, en capacidad de desalación instalada; detrás de los Estados del Golfo Pérsico, con Arabia Saudí a la cabeza, y de los Estados Unidos. En España, actualmente, existen más de 900 desaladoras, que producen 1.540.000 m³ /día de agua desalada. De éstas el 87% son de Ósmosis Inversa; utilizando como materia prima el 49'1% agua de mar y el 50'9% agua salobre. 63 desaladoras tienen una capacidad de producción comprendida entre 600 y 5.000 m³ /día. 17 desaladoras tienen una capacidad de producción comprendida entre 5.000 y 20.000 m³ /día. 16 desaladoras tienen una capacidad de producción de más de 20.000 m³ /día. A finales de 1998, en España, el 4,9% del consumo total de agua para abastecimiento

urbano era agua desalada. El destino de esta agua es: el 56% para abastecimiento, el 20% para regadío y el 18% para Industria.

Las plantas desaladoras de agua de mar han producido agua potable desde hace ya muchos años, pero el proceso era muy costoso. Actualmente se puede producir un aproximado de 24 millones de metros cúbicos de agua desalada diarios en todo el mundo lo que abastece a más de 100 millones de personas.

El proceso de desalinización se lleva a cabo en fábricas conocidas como desaladoras en ellas la sal marina llega de esa manera y sale como agua totalmente bebible y utilizable. En los últimos años el uso del proceso de desalinización ha incrementado notablemente obligando de esta manera que se tengan que construir más desaladoras en variados puntos a nivel mundial. En el mundo los países que cuentan con más de estas fábricas y que utilizan más este proceso son España con un total de 900 plantas e Israel que con solo 3 plantas puede producir 300 millones de metros cúbicos en un año.

Las plantas desaladoras también tienen inconvenientes como por ejemplo, que en el proceso quedan residuos salinos que puede afectar en la fauna y la flora, también estas plantas tienen un gran consumo de energía eléctrica por lo cual en los últimos años se busca construir en diferentes países plantas menos contaminantes y más productivas que utilicen fuentes de energía naturales y renovables.

Cuando en Enero de 1990 se pone en marcha Las Palmas III, la mayor planta desaladora del mundo con membranas en ese momento, se rompe un poco lo que hasta entonces había sido la norma en la tecnología de plantas desaladoras y representa realmente la ruptura con el pasado.

Por ejemplo en Libia, con una notable capacidad desaladora instalada y donde se proyectan nuevas plantas, pero donde no es el único recurso excepcional, compitiendo con los más de 3.500

km de tuberías de 4 m de diámetro, instaladas para traer el agua desde un acuífero del interior del desierto hacia la costa.

Y también en Arabia Saudita como otro importante ejemplo de uso de la desalación, el mayor del mundo con casi 6 Mm³ /d de producción de agua desalada, aquí las condiciones son distintas pues se trata de un país desértico que es el primer productor mundial de petróleo con 9 Millones de barriles/d y donde desde hace años existe el equivalente a un Ministerio para la desalación (SWCC).

También tenemos en Estados Unidos dos ejemplos singulares sobre aplicación de la desalación, la desaladora de Yuma de 300.000 m³/día que se construyó hace unos 20 años y que nunca llegó a funcionar, pero cuyo objeto era desalar las aguas del río Colorado, que como consecuencia de los retornos de los regadíos de la zona, llegaba a México en unas condiciones poco apropiadas para su uso.

Otra desaladora en Brockton, cerca de Boston, va a desalar agua del río Taunton para varios municipios y las conducciones tienen que atravesar y se aceptadas por unos y otros. Singapur es otro ejemplo de uso de tecnología de desalación para romper su dependencia respecto al suministro de agua de otro país, Malasia desde el que recibe agua a través de una tubería, suministro sobre el que existe un acuerdo.

España fue de los primeros países en adoptar estos métodos de desalación la primera planta desaladoras en España estaba ubicada en Lanzarote en el año de 1965 actualmente en este país existen más de 700 plantas a lo largo de todo el país.

El desarrollo industrial y los avances tecnológicos han experimentado un rápido crecimiento en las últimas décadas lo que la ha llevado a ser uno de los sectores más importantes en la

economía. La tecnología ha ido de la mano en el área industrial de productos variados para surgir algunas necesidades de la humanidad.

Las primeras instalaciones diseñadas de tipo térmico en los años 70 (MSF, MED y CV), tenían consumos que podían superar los 30-40 kWh/m³ de agua desalada.

Más tarde en los 80 se llegaron a valores de 15 kWh/m³ para las plantas de compresión de vapor y 8-10 kWh/m³ para las de ósmosis inversa, llegando hoy en día a valores en torno a 3 kWh/m³ en el campo de la desalinización por ósmosis inversa, y mejorando con pasos pequeños a través de sucesivas innovaciones tecnológicas en los sistemas de recuperación energética.

Según el IDA (International Desalination Association and GWI DesalData), en el 2013 se esperaba que entraran en funcionamiento plantas de desalación con una capacidad total de 6 millones de m³/día, alcanzando la capacidad total de 80,9 millones de m³/día entre todas las 17.277 plantas de desalación que se encuentran por todo el mundo.

El incremento de esta capacidad, está cada vez más marcado por el sector industrial, pues desde el año 2010, el 45% de las nuevas plantas de desalación fueron encargadas por industrias como centrales eléctricas y refinerías.

Por otro lado se espera que el 1% de población que ahora depende de la desalación aumente hasta el 25% en 2025, lo que conllevaría una brutal subida en la ejecución de plantas desaladoras. Y todo ello se debe en gran parte al número de países emergentes con grandes problemas de escasez de agua los cuales se agravan debido al aumento poblacional y desarrollo industrial, derivando así mismo en un incremento de la contaminación de los recursos hídricos. (India, norte de África, Australia, Oriente Próximo...)

A día de hoy, el método de desalinización es utilizado en 150 países, siendo Arabia Saudita el que más capacidad instalada tiene, pero se prevé que en los próximos cuatro años algunos países dupliquen su capacidad, como: Sudáfrica, Jordania, México, Libia, Chile, India y China.

Según el Cleantech Group, China tiene previsto invertir 3.000 millones de dólares en tecnologías de desalación, e India pasaría a triplicar para 2017 su conjunto de desaladoras, de 180 a 500.

Respecto al consumo, desde el punto de vista sectorial, el municipal es el que utiliza la mayor cantidad de agua desalada, pero son las industrias, tales como la generadora de energía, las que tienen el mayor número de instalaciones desaladoras.

Municipal: 63% Industria: 25,8% Centrales eléctricas: 5,8% Riego: 1,9%

Turismo: 1,9% Militar: 1,1% Otros: 0,7%

En cuanto al agua de alimentación utilizada, un 59% proviene de agua de mar, seguido de agua salobre con un 22%, un 9% de agua de ría y un 5% de agua residual y agua pura cada una.

Por ahora, las técnicas que están a la vanguardia son la tecnología termal y la tecnología de membranas, consiguiendo estas últimas un rápido crecimiento desde 2003, quitándole terreno a la termal, pero la termal también sigue creciendo aunque se espera su estancamiento.

Los porcentajes actuales en cuanto a capacidad instalada son:

Osmosis inversa: 60% Electrodialisis: 3,6% Electrodialisis inversa: 0,3%

Destilación instantánea en múltiple etapas: 26,8 % Destilación multiefecto: 8%

Otros: 0,3%

Por todo lo descrito, las plantas de desalinización son cada vez más grandes, y si volvemos la vista atrás, vemos que las siete plantas con más capacidad en el mundo han sido puestas en servicio o contratadas desde 2009, destacando Ras Azzour (recientemente rebautizada Ras Al

Khair) en Arabia Saudita con la mayor capacidad a través de tecnologías de MSF y osmosis inversa.

Es de mencionar que en el Mercado de la desalación, Estados Unidos ha sido líder en plantas de aguas salobres y lo consigue centrándose en las membranas, mientras que los Estados Árabes del Golfo Pérsico lo son en plantas de agua de mar a través de la tecnología térmica.

La razón de que los estados árabes del Golfo Pérsico sean líderes en desalación térmica viene del fácil acceso al suministro de petróleo.

Recientemente, España y los Emiratos Árabes Unidos se han posicionado por delante de Estados Unidos en el mercado mundial de la desalación, quedando este en cuarto lugar.

6 Capítulo 5

6.1 La desalinización en Colombia

Colombia es hoy la cuarta nación más rica en recurso hídrico en la Tierra después de Canadá, Rusia y Brasil. Sin embargo la nuestra no escapa a las angustias de su población por garantizar más y mayores fuentes de agua consumible. Por ello la necesidad de conocer, aplicar con mayor rigor y seriedad y revisar la normatividad vigente aplicable frente a las necesidades de acceder al agua. Y hoy es más urgente hacerlo, pues además de las tradicionales causas de deterioro del recurso hídrico, tales como la tala indiscriminada de bosques especialmente en áreas de nacederos, la colonización desordenada muchas veces propiciada por el deseo de expandir la frontera agrícola o para cultivos ilícitos, la urbanización causada por fenómenos de desplazamiento por violencia o fenómenos culturales, el aumento de vertimientos sin control o tratamiento, el aumento de residuos sólidos, entre otros, ahora se avecina una nueva era de explosión demográfica que algunos predicen acabará con el mundo civilizado poco después del año 2100(1). (1) SARTORI, GIOVANNI. *La tierra explota. Madrid 2003*

La ubicación geográfica, la variada topografía y el régimen climático que caracterizan el territorio colombiano han determinado que éste posea una de las mayores ofertas hídricas del planeta como ya lo mencionamos atrás. Sin embargo, esta oferta no está distribuida homogéneamente entre las diferentes regiones del país y adicionalmente está sometida a variaciones temporales y alteraciones en su calidad que determinan la disponibilidad del recurso hídrico.

Si bien se reconoce la riqueza hídrica nacional, tanto en la distribución espacial como temporal, este enorme potencial se restringe en su aprovechamiento por la confluencia de múltiples

factores antrópicos que han generado efectos en los componentes del ciclo hidrológico y, en especial, sobre la calidad del agua por la incorporación de residuos a las fuentes abastecedoras. También lo afectan en buena medida los patrones de aprovechamiento, caracterizados por mecanismos de uso poco eficientes del recurso.

6.1.1 Planta Desalinizadora En Manaure (La Guajira)

El Municipio de Manaure está situado a los 11° 30' y 11° 45' Latitud Norte y a los 72° 25' y 73° 00' Longitud Oeste, en la parte media del Departamento de la Guajira. Este municipio lo conforman nueve corregimientos y tiene una extensión aproximada de 1,643 kilómetros cuadrados. (Alcaldía de Manaure -La Guajira, 2016).

Calidad del agua en Manaure. La calidad del agua apta para consumo humano implica la existencia de unas condiciones físico-químicas y bacteriológicas que aseguren su potabilidad. A partir de la evaluación de dichas condiciones se garantiza que el agua que se va a consumir tiene el tratamiento y desinfección necesarios para asegurar su potabilidad. Por otra parte el Decreto 475 de 1998 fija los criterios y los parámetros que debe cumplir el agua que se suministra para consumo humano (*Diagnóstico sobre la calidad del agua para el consumo humano en Colombia, en el marco del derecho humano al agua*).

Por tal motivo el indicador de calidad del agua es de suma importancia dentro del análisis de la situación actual del usuario al hacer uso continuo del servicio de acueducto, porque establece en qué condiciones se encuentra el agua que están consumiendo los habitantes del municipio de Manaure. (Iguarán, 2004, pág. 73).

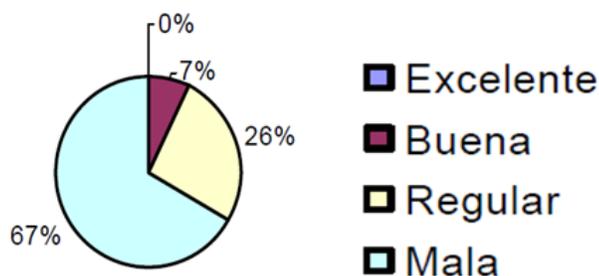


Figura 3. Calidad del agua recibida por las redes

En la (Figura 3), se muestra la calidad del agua recibida por redes, donde la mayoría, es decir el 66.67% de las personas que reciben el servicio de agua, expresan que la calidad de ésta es mala. Lo cual genera una alerta a las autoridades del orden Departamental y Municipal para solucionar cuanto antes la problemática (Iguarán, 2004, pág. 75).

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente y sabiendo que “la empresa de Servicios Públicos Domiciliarios del Municipio de Manaure, tiene como misión prestar un servicio de calidad, eficiencia y continuidad de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo, mediante la utilización y aprovechamiento de las nuevas tecnologías,” (Iguarán, 2004, pág. 35).

Por tal motivo se cuenta hoy en día con un novedoso sistema de desalinización a través de una Planta de Osmosis Inversa con capacidad de producción de 2.000 L/d, completamente automatizada. La cual fue instalada por la Empresa Aguas y Energía E.U. Gerenciada por el Ingeniero Arnaldo Osorio ubicada en el municipio de Maicao. (*planta desalinizadora de osmosis inversa en Manaure , 2016*).

La planta cuenta con un sistema de tubería industrial Corzan, que brinda resistencia a la corrosión y soporta sustancias químicas severas como el ácido sulfúrico, ácido hidroclicóric, ácido nítrico, ácido fosfórico, hipoclorito sódico y cloruro férrico. La tubería es realizada en

cloruro de polivinilo clorado (CPVC) de alto rendimiento, el único producto en el mercado con la capacidad de soportar grandes presiones permitiendo a su vez variedad de aplicaciones (*Lubrizol CPVC Piping Systems and Materials, 1959*)

La entrega fue oficializada por parte del director de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), Carlos Iván Márquez Pérez como representante de Colombia; Bongsoon Jan, Director de KOICA; Myung-soo Jang, Embajador de Corea en Colombia; Dal Jun Park, Presidente de la Compañía Coreana Ssang; Viceministro de Agua y Saneamiento Básico, Carlos Eduardo Correa; la Gobernadora de la Guajira, Oneida Pinto Pérez; y del alcalde de Manaure, Aldemar Ibarra Mejía. (*Manaure ya tiene agua potable con una planta desalinizadora, 2016*).

Históricamente, el agua potable llegaba a gran parte de Manaure a través de camiones cisterna, abastecidos con agua de pozos profundos lo que significaba tener un suministro intermitente. Con la puesta en marcha de la planta desalinizadora se podrá garantizar el abastecimiento permanente para beneficio de toda la comunidad. “Proveer agua es muy importante para la calidad de vida de un pueblo afirmó” (Myung-soo Jang), embajador de Corea en Colombia. (*Desde hoy llega a Manaure agua potable permanente, 2016*)

6.1.2 Construcción Y Operación De Una Planta Desaladora En Campos Petrolíferos De Colombia

La planta está ubicada en el campo petrolífero de Pacific Rubiales en Puerto Gaitán, en el departamento del Meta. Pacific Rubiales, es una empresa canadiense y productora de gas natural y petróleo crudo pesado, es la propietaria de Meta Petroleum Corp., una empresa operadora de petróleo de Colombia que explota los campos petrolíferos de Rubiales en asociación con Ecopetrol. (*Planta Desalinizadora -Pacific Rubiales, 2014*).

RWL Water es el encargado de la construcción y operación por un período de diez años, de la planta para tratar agua salobre proveniente de la extracción de petróleo en rubiales. Esta planta tendrá una producción de 500.000 barriles por día, lo que equivale a (79.500 m³/día), la instalación proporcionará agua desalinizada para uso agrícola y riego de árboles del sector, reemplazando a su vez al actual método de eliminación de inyección en pozo profundo que emplea Pacific Rubiales para las aguas residuales. *(Pacific Rubiales contruirá planta de tratamiento de agua con RWL Water, 2012)*

Para el desarrollo del proyecto se colocó en funcionamiento y operación una unidad piloto en el propio sitio durante seis meses y a partir de esta se optimizará el diseño del proceso con base en los resultados obtenidos de las pruebas previstas. El diseño final de la planta abordará importantes retos tecnológicos automatizados tales como, la eliminación de hidrocarburos del agua. Sumado a ello esta planta cuenta con un sistema integral que emplea diversas etapas de tratamiento con tecnologías innovadoras de separación y filtración, antes del sistema de osmosis inversa de alta recuperación de aproximadamente 95%. *(Tratamiento y Desalinización de Agua Salobre para su Reutilización en un Campo Petrolífero: Colombia, s,f)*

Se planificaron tres etapas de osmosis inversa, la salmuera resultante del proceso será reinyectada por el cliente en el acuífero. Esta planta limitará impactos ambientales minimizando el rechazo de salmuera por medio del tratamiento final de lodos. *(Tratamiento y Desalinización de Agua Salobre para su Reutilización en un Campo Petrolífero: Colombia, s,f)*

El Grupo RWL Water es un integrador de sistemas de tratamiento de agua con rápido crecimiento mundial y avanzadas tecnologías de potabilización y reciclaje. La empresa ha diseñado plantas para clientes en los siete continentes en forma accesible y con eficiencia, de tal

manera RWL Water cuenta con una reconocida reputación por sus excelencias en ingeniería, gestión y ejecución. (*RWL Water construirá y operará una planta de tratamiento para la desalinización de agua salobre con una capacidad de 500.000 barriles por día, 2012*)

6.1.3 Proyecto "Desaladora reversible" Almería

El Boletín Oficial del Estado del 23/9/05 hizo pública la convocatoria por parte de “Acuamed” (organismo dependiente del Ministerio de Medio Ambiente) del concurso destinado a la construcción de una Desaladora Reversible capaz de producir treinta hectómetros cúbicos anuales de agua potable en el Poniente Almería. A diferencia de las desaladoras tradicionales, la de Almería funciona por el sistema de Presión Natural (Patente2094697), que permite desalar a muy bajo coste, tanto más bajo, cuando más aumenta el precio de la energía.

Para el caso de La Guajira, se planteó como opción el corregimiento de El Pájaro, un sitio turístico por su riqueza hídrica y hermosas playas, con miles de kilómetros de tierra sin intervenir, que servirían para la construcción de la primera planta desaladora en Colombia. Realini, Silvana (Año desconocido) Consumo total de agua diario.

6.1.4 Planta De Ósmosis Inversa Agua Potable Para Uribí, Colombia

El municipio de Uribí está ubicado al norte del departamento de La Guajira, Según información del DANE, a partir del Censo Nacional (2005), Uribí contaba con 117.674 habitantes, donde la gran mayoría hace parte del pueblo Wayuu. Este Municipio enfrenta altas sequias y desabastecimiento de agua potable al igual que muchos municipios de este departamento, por tal motivo la Administración Municipal de Uribí integrará sus recursos institucionales para suplir las necesidades básicas insatisfechas de sus habitantes en la actualidad y para un futuro. (Plan Municipal de Desarrollo comprometidos con Uribia, 2012, pág. 38).

Ante la necesidad de remediar la problemática que enfrenta este municipio se instalaron sistemas e infraestructura con nuevas tecnologías que permitan mejorar la calidad del agua suministrada a la población. Para lograr tal fin se cuenta con una planta integrada (ver figura 4) con tecnología de osmosis inversa, recurriendo a membranas que permiten realizar simultáneamente los procesos de desalinización y potabilización. “El uso de una tecnología moderna, que demanda costosos aditivos (anti incrustante), como también alto consumo de energía eléctrica, elevan considerablemente el costo de tratamiento de un metro cubico de agua” (*República de Colombia departamento de la Guajira Alcaldía de Uribí. Informe de gestion, 2014*)



Figura 4. Planta desalinizadora Uribí

El funcionamiento de la planta instalada se da de la siguiente manera, para convertir agua de mar en agua potable, los sistemas de desalinización utilizan membranas de alta calidad que separa las sales disueltas y permite pasar sólo el agua pura a través del tejido de la membrana. Estos sistemas están diseñados para proporcionar un alto rendimiento de agua con un consumo mínimo

de energía, este modelo tienen capacidades de 380 GPD hasta 500,000 GPD. (*República de Colombia departamento de la Guajira Alcaldía de Uribí. Informe de gestión, 2014, pág. 18*).

Los sistemas más grandes pueden ser diseñados y fabricados con Características propias, principales unidades de recuperación de energía de 64,000 GPD o mayor. También Integra cartuchos para filtros hechos de plástico, Bomba de alta presión con multi-etapas Dúplex SS 2205, Tubería de alta presión Dúplex SS 2205, Variador de frecuencia con botón de arranque suave, válvulas de seguridad, interruptores e Instrumentación resistente a la corrosión. De igual forma membranas compuestas de filtros finó con alto rechazo. (*República de Colombia departamento de la Guajira Alcaldía de Uribí. Informe de gestión, 2014, pág. 17*)

7 Capítulo 6

7.1 Marco legal y normativa para el proceso de desalinización en Colombia

Todos los proyectos hidráulicos, al ser actividades antropogénicas, generan un impacto ambiental, por lo que es necesario, mediante el soporte de un marco legal apropiado, mitigar estos impactos buscando opciones más sustentables y ecoeficientes (Hernández et al., 2006). Por ejemplo, los desechos hipersalinos de las plantas desaladoras no han sido suficientemente evaluados en cuanto a impacto en flora y fauna (Lattemann y Hoepner, 2003 y 2007). Por lo anterior, los esfuerzos realizados por atender y actuar ante los problemas ambientales deben ser reconocidos, el manifiesto de la necesidad de atención y acción concreta para cambiar de la situación de normatividad ambiental actualmente existente, ha transcurrido en cambios básicos necesarios, principalmente la reestructuración de leyes y normas, en las cuales la sustentabilidad ambiental se viene tornando el principio organizador (Jiménez, 2006).

Curiosamente, mientras todos los sociólogos y ambientalistas pronostican que la escasez de agua se convierte en la principal pesadilla para la humanidad y que seguramente las guerras seguirán siendo motivadas por agua (porque ya comenzaron como en Somalia, Etiopía, Israel – Siria, Israel – Palestina, entre otras) a pocos se les ha ocurrido investigar y reevaluar sobre la normatividad colombiana respecto del acceso a los recursos hídricos.

En Colombia la legislación ambiental ha tenido un importante desarrollo en las últimas tres décadas, en especial, a partir de la Convención de Estocolmo de 1972, cuyos principios se acogen desde el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente contenido en el Decreto Legislativo, hoy Decreto Ley, 2811 de 1974 (que se constituyó en uno de los primeros esfuerzos en Iberoamérica para expedir una normatividad

integral sobre el medio ambiente). Principios que hoy se han expandido gracias a la Ley 99 de 1993 (que incorpora expresa o tácitamente los principios de las Declaraciones de Estocolmo de 1972 y de Río de Janeiro de 1992 según lo dispone el Numeral 1 del Artículo 1); al Decreto 048 de 2001 e incluso a la jurisprudencia de la Corte Constitucional.

Luego, en 1991, como fruto de la nueva Constitución Política colombiana, se redimensionó la protección medio ambiental dejando atrás concepciones antropocéntricas y sustituyéndolas por una biocéntrica, elevándola a la categoría de derecho colectivo y dotándola de mecanismos de protección por parte de los ciudadanos, en particular, a través de las acciones populares o de grupo y, excepcionalmente, del uso de las acciones de tutela y de cumplimiento. Esto ha llevado a muchos, incluso foráneos, a reconocer la nuestra como “...una Constitución totalmente verde”

En desarrollo de los nuevos preceptos constitucionales, y de acuerdo con la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, realizada en la ciudad brasilera de Río de Janeiro en junio de 1992, se expidió la Ley 99 de 1993, que conformó el Sistema Nacional Ambiental (S.I.N.A) y creó el Ministerio del Medio Ambiente como su ente rector (hoy Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial). Con esta ley quiere dársele a la gestión ambiental en Colombia una dimensión sistemática, descentralizada, participativa, multiétnica y pluricultural.

La normatividad vigente más destacada sobre aguas marinas y zonas costeras se halla en:

1. La Constitución Política (Artículos 2,101 y 102)
2. La Convención Marpol de 1978
3. El Decreto Ley 2324 de 1984

4. La Ley 56 de 1987 sobre protección del mar por derrames de hidrocarburos
5. El Decreto 644 de 1990, Reglamentario del Decreto Ley 2420 de 1984 sobre investigaciones científicas o tecnológicas marinas
6. La Ley 12 de 1992 por la cual se aprobó el Protocolo de Aguas Marinas

Actualmente, la norma que recoge sustancialmente las disposiciones más actualizadas sobre las competencias y tipos de autorizaciones para usar las aguas marítimas es el Decreto Ley 2324 del 18 de septiembre de 1984 por el cual se reorganizó a la Dirección General Marítima y Portuaria – DIMAR.

El capítulo A.11.2 del Reglamento Técnico (RAS 2000) SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN DE AGUAS. Cita:

A.11.2.13 Desalinización. (Artículo 118) Cuando la fuente de agua superficial o subterránea tenga un contenido de cloruros superior al valor admisible de 250 mg/L, y no habiendo otra fuente económicamente disponible, deberá usarse la ósmosis inversa, la electrodiálisis (inversa) o la nanofiltración para remover los cloruros. Estos procesos de desalinización usuales para el tratamiento del agua de mar o agua salobre, deben utilizarse cuando previamente se haya demostrado que son los que presentan un menor costo de producción del agua potable respecto a otros sistemas (como evaporadores). Si un proceso de separación por membranas es seleccionado para efectuar la desalinización, el estudio previo debe presentar por lo menos dos configuraciones alternativas de las membranas (paso sencillo o doble o sistema por etapas).

8 Capítulo 7

8.1 Impacto ambiental de la desalinización

8.1.1 La desalinización en el proceso de potabilización del agua

El agua que es usada para la producción de agua potable contiene moléculas de sustancias perjudiciales para la salud. Una de las propiedades esenciales del agua es que puede disolver fácilmente ciertas sustancias. Por ejemplo, las aguas lluvias al precipitarse sobre la tierra a medida que van cayendo se disuelven una gran cantidad de componentes químicos a través de partículas y gases como el oxígeno. Por lo general el agua, por muy natural que esta sea trae consigo contaminantes presentes en el aire se disuelven en la misma. De igual forma el agua que se filtra en el suelo y forma las aguas subterráneas generalmente tienen una gran cantidad de minerales disueltos, como resultado del contacto con el suelo y las rocas. Las actividades humanas, como son la agricultura y la industria generan gran cantidad de contaminantes que luego se descargan a las aguas residuales. Todo esto es para hacernos a una idea en cuanto la importancia de potabilizar el agua antes de pasar al consumo humano, evitando enfermedades que pueden ser drásticas para la salud. En este aspecto se observa que la potabilización del agua puede llegar a prevenir cualquier riesgo al momento de su consumo.

De acuerdo a Jáuregui, (2004) “La potabilización del agua, tiene por objeto provocar los cambios físicos, químicos y biológicos que conviertan al agua, de estado natural a condiciones potables” (p. 123), es decir que a través del proceso de potabilización el agua queda en condiciones de uso y consumo humano. Se puede entender el tratamiento del agua, desde un punto de vista potabilizador, como aquel proceso de naturaleza físico-química y biológica, mediante el cual se eliminan una serie de sustancias y microorganismos que implican riesgo para la salud. “Todo

sistema de abastecimiento de agua que no esté provisto de medios de potabilización, no merece el calificativo sanitario de abastecimiento de agua segura” (S., 2004)

Existen procesos naturales donde los contaminantes son eliminados del agua mediante procesos biológicos. Cuando el agua sedimenta en la tierra o las capas subterráneas se producen la filtración natural del agua (L., Métodos e técnicas de tratamiento de agua. Volumen II., 1993) sin embargo la capacidad de auto depuración del agua no es suficiente para producir agua apta para consumo humano. “Además existen gran cantidad de contaminantes introducidos en las aguas debido a las actividades agrícolas o industriales” (L., Métodos e técnicas de tratamiento de agua. Volumen II. , 1993). Por tal motivo es importante implementar medidas acordes a las necesidades en relación a los contaminantes del agua, pues esta por lo general necesita tratarse para poder ser agua apta para consumo humano, y cumplir con las exigencias legales que regulan la materia, desde el punto de vista de estándares físicos, bacteriológicos y químicos. “Para nadie es desconocido que el agua para el consumo no debe contener olores o sabores, y debe de ser agua clara y químicamente estable (ej. sin compuestos corrosivos)” (L., Métodos e técnicas de tratamiento de agua. Volumen II. , 1993)

Autores como Greene & Mortonsimons, (1988) consideran que la eliminación de materias que deterioran las características físico- químicas y organolépticas del agua, así como la eliminación de bacterias y otros microorganismos que pueden alterar gravemente nuestra salud son los objetivos perseguidos y conseguidos en las estaciones de tratamiento a lo largo de todo un proceso que al final logra suministrar un agua transparente y de una calidad sanitaria garantizada. De igual forma Mc Mahon, (1989) considera que en la potabilización del agua se debe recurrir a métodos adecuados a la calidad del agua de origen a tratar. Esto teniendo en cuenta que

...el mejoramiento de la calidad del agua en las plantas de potabilización generalmente integra una serie de procesos u operaciones que gradualmente permiten convertir un agua cruda de un río, lago, mar o pozo de agua subterránea en agua que cumpla ciertos parámetros de calidad de agua establecidos en las normas de algún país. En las plantas que utilizan coagulación química y filtración rápida se considera que el agua clarificada es aquella que ha sido sometida a procesos de coagulación, floculación y sedimentación (Cruz, (2014))

8.1.2 Desalinización y la contaminación atmosférica

La realidad es que las plantas desaladoras son una de las infraestructuras con menor y más asumible impacto ambiental, y más si las comparamos con similares como puedan ser las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales. Estas “Fábricas de Agua”, recluidas en instalaciones de escasa altura y capaces por tanto de ser integradas perfectamente en el paisaje en que se inscriban, presentan una contaminación atmosférica absolutamente nula, una contaminación sónica perfectamente asumible mediante aislantes acústicos, y conducciones totalmente capaces de ser integradas, simplemente con ejecutarlas enterradas.

8.1.3 Desaladoras y emisiones de CO₂

También se suele acusar a las desaladoras de un incremento desmesurado en las emisiones de anhídrido carbónico, ignorando el gigantesco salto que la tecnología de la desalación ha efectuado desde sus inicios en la década de los setenta hasta nuestros días. Presumiblemente basándose en que hasta mediados de los 80, los procesos de desalación más utilizados era el de “destilación instantánea multicapa”, que además de consumir del orden de unas veinte veces más energía de que las plantas actuales de ósmosis inversa, una parte muy importante de esa energía

era en forma de calor. Al respecto, cabe destacarse que las plantas desaladoras que se diseñan en la actualidad:

- No utilizan calor.
- Sólo consumen energía eléctrica
- Y en consecuencia: No desprenden CO₂

De entre los diversos efectos ambientales de la desalación las emisiones de CO₂ es uno de los más graves. Estas emisiones se suelen imputar al proceso de la desalación, sin embargo, no es cierto que la desalación emita CO₂. Las emisiones son debidas al consumo energético, en este sentido, cualquier maquinaria que consuma electricidad está haciendo emisiones, claro que como la proporción de energía que consume la desalinización es muy elevada.

Se está investigando desde hace años, la manera de minimizar el problema del alto consumo de energía de las desaladoras. De hecho, existe ya una tecnología para crear energía basándose en la propia salmuera: un dispositivo llamado WEER (Intercambiador de Presión) y que podría traducirse al castellano con las siglas SIPRE (Sistemas intercambiadores de presión para la recuperación de energía), los cuales transfieren energía directamente de la salmuera al flujo de alimentación sin los problemas de rendimiento de los ejes giratorios de alta velocidad de las fábricas actuales. Ello supone un avance importante en la recuperación de energía existente en el rechazo ya que permiten disminuir en veinte puntos porcentuales el exceso de consumo de energía respecto al valor teórico con las membranas actuales, pasando del 54'2 % al 34'3 %.

La construcción de los edificios que albergan los elementos propios de desalación son naves industriales de escasa altura, unos 11 metros, que carecen de cualquier tipo de emisión a la atmósfera y en consecuencia no generan contaminación alguna al respecto, y que al edificarse aislados pueden absorber totalmente el ruido generado por los motores eléctricos asociados al

proceso de ósmosis inversa, habitual en los diseños de las desaladoras de Acuamed, desde el punto de vista de su impacto visual y paisajístico, son fácilmente integrables en su entorno, tal y como se muestra en las fotografías que se adjuntan. En lo que se refiere a la crítica de que las desaladoras producen un impacto estético y visual en las zonas en que se implantan, un viejo refrán español dice que una imagen vale más que mil palabras, a las fotografías de las desaladoras reflejadas basta con añadir las imágenes de una desaladora y la de un hotel que se construye en el mismo término municipal. (Torres Corral, (octubre 2004))



Desaladora de Alicante (España)

Fuente: http://www.ciccp.es/biblio_digital/Icitema_III/congreso/pdf/010503.pdf



8.1.4 Desalación con energías renovables

Las energías renovables nos permiten consumir energía sin emitir CO₂ a la atmósfera, puesto que estas emisiones son quizás el gran problema ambiental de la desalinización, a menudo se habla de las posibilidades de vincular de un modo directo o indirecto la desalinización con las energías renovables. Abastecer directamente una desaladora mediante energías renovables, significa que se produce energía con unos aerogeneradores, placas solares u otros sistemas, y se emplea dicha energía exclusivamente en la planta. A menudo, si hay excedentes de energía estos se ceden a la red eléctrica a cambio de una compensación económica.

8.1.4.1 Desalación eólica

Se denomina desalación eólica a un sistema de desalación que es abastecido energéticamente mediante aerogeneradores. Existen diversas variantes, de desalación eólica, cuya diferencia principal reside en si se emplea la energía mecánica de los aerogeneradores o si bien se consume la electricidad que estos producen. Empleando directamente la energía mecánica, la eficiencia es mayor, sin embargo, no pueden venderse los excedentes de electricidad en caso de que los hubiere. Con la puesta en marcha del Programa A.G.U.A, no tardaron en aparecer las críticas acerca del elevado consumo energético que era necesario para alimentar a todas las plantas previstas. El gobierno se comprometió a producir mediante energía eólica, al menos la misma cantidad de energía que se estaba consumiendo con las desaladoras.

8.1.4.2 Desalación solar

En la actualidad se investiga con el fin de conseguir que las técnicas de desalación a través de la tecnología solar puedan llegar a ser una fuente sostenible para la obtención de estos recursos hídricos que son cada vez más escasos. Los sistemas de desalación que se emplean en la actualidad presentan como inconveniente el que necesitan grandes cantidades de energía para su

funcionamiento así como también necesitan de inversiones muy costosas para su implantación. Al emplear combustibles fósiles en la desalación se emiten gases de efecto invernadero, por este motivo es importante estudiar la viabilidad de los sistemas de desalación alimentados con energías renovables.

Los sistemas de desalación solar térmica se dividen en dos grandes grupos según su configuración:

- Desalación solar térmica directa. En esta el colector y el destilador están integrados.
- Desalación solar térmica indirecta. En este sistema el colector y el destilador están compuestos por elementos bien diferenciados.

8.1.5 Sistemas de desalación acoplados a sistemas de energías renovables

Las energías renovables en general y la energía solar en particular pueden y deben jugar un papel relevante para ayudar a conseguir el objetivo de desarrollo sostenible durante la desalación de agua salobre y marina. El binomio energía renovable más desalación ha tomado importancia en la solución a la falta de agua en regiones donde la escasez es muy severa y la desalación contribuye para solucionar este problema. Bajo este contexto, se han encontrado tres campos específicos de investigación en los que la energía solar puede aportar importantes avances científicos y tecnológicos para el logro de soluciones sostenibles para los problemas del agua:

1. Desalación del agua de mar;
2. Desinfección del agua (eliminación de elementos patógenos), y
3. Eliminación de contaminantes industriales peligrosos en el agua mediante procesos fotoquímicos.

A la hora de elegir un tipo de energía renovable u otro debemos de tener en cuenta:

- Los distintos tipos de fuentes renovables disponibles en el emplazamiento y la calidad de las mismas.
- El tamaño de la desaladora que hay que abastecer.
- La salinidad que tiene el agua con la que vamos a trabajar.
- La localización de la desaladora.
- La disponibilidad de personal cualificado para su operación y mantenimiento.

8.1.6 Problemas y soluciones de la desalación con energías renovables

El problema de combinar plantas de desalación con energía solar es el mismo que nos encontramos con la energía eólica, y es que las desaladoras han sido diseñadas para trabajar con una fuente de energía prácticamente constante. De no ser así, surgen complicaciones en su operación y baja el rendimiento de la planta, esto nos da un nefasto contraste con las energías renovables. Para minimizar los efectos de esta incompatibilidad podemos emplear las siguientes tácticas:

- Utilizar sistemas de almacenamiento energético, con el fin de disponer siempre de energía (el problema de este es que encarece la inversión)
- Emplear de forma combinada varias energías renovables como pueden ser la solar y la eólica, o bien complementar energías renovables con no renovables.
- Controlar de forma combinada del sistema de captación de energías renovables y de la desaladora.

9 Ventajas y desventajas de la desalinización del agua

El proceso de desalinización del agua consiste en eliminar la sal contenida en el agua de mar, para transformarla finalmente en agua dulce. Por esta razón las plantas desalinizadoras o desaladoras permiten distintos procesos que son indispensables para la elaboración de ciertas industrias y conglomerados urbanos, precisamente de aquellos que están cerca de desiertos o lugares donde el agua potable es un bien escaso, aunque existen reservas o fuentes de agua salada importante.

Las principales ventajas de la desalación son las siguientes:

Inmediatez en la disponibilidad del agua y fiabilidad que da la autonomía y la producción continua de agua

Calidad del agua-producto. Se trata de un “agua a la carta” cuya calidad es óptima ya que las membranas de “poliamida” consiguen un rechazo de sales del 99,4 al 99,6 %, pudiendo llegarse a obtener agua casi destilada. La calidad del agua-producto la hace apta para abastecimiento, riego agrícola, usos industriales...

Posibilidad de utilización de energías renovables.

Libera recursos hídricos superficiales y subterráneos, que en muchos casos proceden de fuentes sobreexplotadas.

Se adapta muy fácil y rápidamente a la evolución de la demanda por su carácter modular.

Las desventajas asociadas a los procesos de desalinización radican en:

- La interrupción del ecosistema, pues se ve interrumpido el ciclo natural de muchos organismos marinos
- Introducción de nuevos contaminantes al ambiente que se ve en contacto con el proceso
- Genera un agua más cara que la procedente de fuentes convencionales.

- Impacto ambiental producido por el vertido de la salmuera al mar. La adecuada selección del punto de vertido y un buen diseño del tramo difusor de vertido garantiza la minimización del impacto.
- Emisión de CO₂ por el uso de energía, como cualquier otro sistema de distribución de agua.
- Tienen una vida limitada.

Por ello es preciso que los países que utilicen este sistema además implementen una política regulatoria de la nueva contaminación a la que hay que hacer frente.

Cada uno de los procesos que involucra la desalinización poseen una relación directa con distintos componentes químicos, que más allá de dejar salmuera luego de haber desalinizado, provocan otros inconvenientes al equilibrio establecido, por lo que es menester de los encargados el identificarlos y adoptar medidas que excluyan los efectos indeseados que producen.

De esta forma es previsible el aumento de esta tecnología, aunque tomando las medidas del caso, para evitar que de esta forma se produzcan problemas en la implementación de las nuevas plantas desalinizadoras.

Por todo lo dicho se entiende que la desalación reúne frente a los recursos convencionales una serie de ventajas como:

- Ser un recurso seguro
- Localización cercana al consumo
- Recurso nuevo y no sometido a condicionantes de propiedad previos
- Más rápidamente disponible
- Menos tiempo de construcción
- Menos problemas medioambientales

- Menos problemas sociales

Pero que para su utilización hay que tener en cuenta también que reúne ciertas desventajas como:

- Más caros que otros sistemas, aunque las diferencias se acortan
- Requiere más cuidados en la explotación
- El consumo energético puede ser superior
- Se precisa de personal más cualificado
- No se aprovecha toda el agua disponible
- Puede producir contaminaciones

10 El Futuro de la Desalinización

La adopción de la tecnología de desalación para resolver problemas de escasez de agua es un hecho imparable, puesto que se ofrece como la única alternativa a los recursos naturales que escasean o se contaminan por el uso. Pero su aceptación está todavía sometida a una serie de condicionantes que tienen que ver con la tecnología y la economía. Respecto a la tecnología los avances para la reducción de costes en los procesos térmicos no han sido tan espectaculares como en el campo de las membranas, pero aun así en los costes de inversión y operación se han mejorado mediante:

- Aumento de la capacidad de las unidades
- Reducción de costes de operación. o Automatización.
- Reducción en el número de equipos

Y tecnológicamente a través de

- Nuevos diseños matemáticos

- Aumento de la recuperación
- Temperaturas más elevadas
- Anti incrustantes específicos
- Temperaturas más bajas
- Mejora de la eficiencia de MSF y MED (Falling film, GOR)
- Reducción del consumo energético o Aumento de la eficiencia de los equipos
- Bombas x Nuevos diseños o Uso de membranas de NF como pretratamiento

Pero parece que se ha llegado a un límite difícil de mejorar, por lo que su utilización seguirá cada vez más restringida a los países con abundancia de recursos petrolíferos. Respecto a la osmosis inversa existe todavía margen para la mejora, si bien no serán tan espectaculares como las logradas en los últimos cinco años. En lo que se refiere a los Costes de Inversión se pueden reducir por

- Aumento de la conversión
- Aumento de la capacidad de la planta
- Reducción del nº de equipos o Trenes de mayor capacidad o Bombas y turbinas mayores
- Reducción de costes o Membranas o Bombas más sencillas o Bombas menores y recuperadores de presión

Y en lo relativo a la Operación mediante

- Aumento de la conversión o Anti incrustantes específicos
- Reducción costes laborales o Automatización
- Reducción del consumo energético o Aumento de la eficiencia
- Bombas
- Recuperadores de presión

- Nuevos diseños o Aumento producción en 2ª etapa

Pero para regar de forma extensiva con agua desalada será necesario además:

- Emplear las técnicas más eficientes de riego o Riego por goteo o Riego por aspersión
- Emplear las técnicas más eficientes de cultivo o Invernaderos o Hidroponía o Cultivos muy mecanizados
- Utilizar las semillas más productivas
- Plantar los cultivos más rentables

El futuro de la osmosis inversa debe conquistarse sobre la base de mejoras en los diseños, en los equipos y las membranas, especialmente en estas últimas

Los principales problemas a los que se enfrentan las membranas en estos momentos son:

- Facilidad de ensuciamiento
- Baja permeabilidad
- Alto Costo
- Consumo energético mejorable

Y las líneas de trabajo van encaminadas a:

- Diámetros mayores pasando de 8" a 16" para reducir los costes de inversión.
- Al empleo de la Nanotecnología, que mediante la mezcla de materiales orgánicos + inorgánicos puede lograr.
- Elevada permoselectividad
- Resistencia al ensuciamiento
- Mejora de la selectividad

10.1 Costos

Al-Sahali (2007) menciona que los costos de desalinización por unidad de agua producida varían ampliamente, y obedecen al tipo de agua salobre o de mar de alimentación, y a la cantidad de energía necesaria en el sistema de desalinización elegido. Los costos para acondicionar el agua en un sistema tradicional van de 468 a 1,179 pesos/m³. Cuando se utiliza la desalación y la alimentación es agua salobre, el costo va de 782 a 1,563 pesos/m³; cuando la alimentación es de agua de mar, el costo varía de 1.563 a 3,533 pesos/m³. Por otra parte, cuando se combina el sistema tradicional con agua salobre, el costo es de 624 a 1,432 pesos/m³; cuando se trata de agua de mar con el sistema tradicional, el costo es de 577 a 1,588 pesos/m³ (AMTA, 2012).

El precio del agua desalada está en estos momentos estabilizado por debajo del dólar/m³, si bien con variaciones en función de las condiciones económicas en que se realizan los proyectos y que tienen mucho que ver con las garantías que ofrecen a las entidades de crédito los países en los que se van a realizar las inversiones. En el siguiente cuadro quedan reflejadas las tarifas aplicadas a los principales proyectos de desalación que se está realizando actualmente en el mundo.

Tarifas aplicadas en los proyectos de desalación.

Planta	País	Producción m ³ /d	US\$/m ³	Uso
Trinidad	Trinidad- Tobago	109,000	0.710	Industrial y urbano
Taweelah	Abu Dhab, UAE	250,000	0.680 – 0.790	Urbano e industrial
Hamma	Argelia	200,000	0.820 – 0.930	Urbano
Fujairah	Fujairah, UAE	350,000	0.689	Urbano e industrial
Skida	Argelia	100,000	0.739	Urbano
Carboneras	Spain	120,000	0.284	Agricultura
Tampa Bay	Florida-USA	100,000	0.550	Urbano
Campo Cartagena	Spain	145,000	0.350	Agricultura/urbano
Singapur	Singapur	100,000	0.520	Urbano
Beni Saf	Argelia	150,000	0.699	Urbano
Mostaganen	Argelia	100,000	0.729	Urbano
Tlemcen	Argelia	150,000	0.761	Urbano
Cap Djinet	Argelia	100,000	0.727	Urbano
Douada	Argelia	100,000	0.713	Urbano

Ilustración 12. Tarifas aplicadas en los proyectos de desalación

La importancia que tiene la financiación es creciente y ante la falta de recursos económicos suficientes de los países que precisan desalación se están dando cada vez más posibilidades a la alternativa privada. Posproyectos independientes de agua, ligados en muchos casos a la energía, están teniendo una gran acogida, incluso en los países económicamente más poderosos de Oriente Medio puesto que permiten:

La modernización de las infraestructuras de generación de agua y electricidad

- Garantizan la Seguridad del suministro

- No son necesarias inversiones iniciales de los Gobiernos para el desarrollo y construcción de plantas lo que reduce los préstamos directos del Gobierno que pueden ser utilizados para otras necesidades importantes
- Suministro de cantidades fijas de agua y electricidad a costes razonables
- Atracción de un gran número de promotores y contratistas que los hacen competitivos
- Crea oportunidades de inversión para sectores privados internacionales, regionales o locales
- Desplazando al sector privado hacia los servicios públicos, la inversión mejora la eficiencia de la organización privada.

11 Conclusiones

La destilación tiene un elevado consumo energético; requiere una elevada inversión inicial; precisa de una extensión de terreno importante; su eficiencia es baja y no depende de la salinidad del agua. Por otra parte, necesita una fuente de vapor que, según los casos, puede o no ser independiente del proceso; produce agua de calidad casi pura, y puede acoplarse a una central eléctrica productora de energía.

Los costos para los procesos de desalación térmicos (MED, MSF) son muy similares entre los procesos convencionales y los que utilizan energías alternativas, como la solar o la eólica, lo que no es el caso para los procesos de ósmosis inversa, donde la diferencia de costos de inversión entre una y otra es grande. Los procesos térmicos comerciales (MSF, MED, CV, TCV) no se recomiendan para desalar agua salobre debido al alto costo energético requerido, lo anterior significa que consume la misma energía para desalar agua salobre o agua de mar.

La ósmosis inversa tiene el menor consumo energético y puede utilizar tanto agua salobre como de mar, una ventaja ante los sistemas térmicos. El costo de inversión se liga con las características del agua que se pretende desalar y, en general, es inferior respecto a los sistemas térmicos. En este proceso es indispensable el uso de tratamientos físico-químicos que suelen ser muy importantes y claves para elevar el tiempo de vida de las membranas. El terreno en extensión es de tipo medio. Necesita una fuente exterior de energía para operar las bombas de alta presión. Por otro lado, la presencia de iones específicos limita sus posibilidades de aplicación eficiente y su manejo se complica en función de las características físico-químicos del agua.

La electrodiálisis tiene un consumo energético de tipo medio, dado que sólo utiliza agua de baja salinidad, una desventaja respecto a sistemas de OI y térmicos; necesita menores tratamientos químicos que los otros sistemas. Respecto a las necesidades de espacio e inversión, éstas son intermedias, comparándolas con las de otros sistemas. Por otro lado, el costo de instalación es superior a la ósmosis inversa y el agua producto es de calidad inferior a la de las otras tecnologías.

Además de estas características de capacidad para desalar, se trata de concepciones completamente diferentes, dado que el segundo y el tercero se emplean para realizar la separación de una membrana y además efectúan el proceso a temperatura ambiente, mientras que la destilación hace uso de vapor producido en el calentamiento del agua.

La destilación se emplea únicamente en el ámbito comercial para desalar agua de mar; la electrodiálisis para desalar agua salobre, y la ósmosis inversa tanto para agua salobre como para agua de mar. Se concluye que la OI es el proceso más viable en cuanto a producción, energía consumida, costo y variabilidad en las fuentes de abastecimiento, sin olvidar que se debe seguir mejorando dicho sistema de producción para que sea sustentable.

Las energías renovables jamás van a alcanzar un nivel de costo inferior al que hemos disfrutado con las denominadas energías convencionales. La razón para ello es muy simple: las energías renovables poseen un valor añadido muy importante que las otras no tienen, que es el de la sostenibilidad. Sin embargo, uno de los principales obstáculos al desarrollo de las energías renovables es la oposición de algunos sectores políticos y empresariales a la entrega de incentivos o subsidios. Algunas de las razones aducidas son la distorsión que puede provocar en un sistema de libre competencia las ayudas, incentivos y subsidios del Estado, al favorecer las fuentes renovables por sobre las convencionales (CETENMA, 2011). Al final, como se indicaba,

nuestra sociedad debe tomar con urgencia el compromiso entre beneficios, costos y riesgos, que se quieren o se pueden asumir cuando se aplica a sistemas de desalación.

Es posible desalinizar agua sin incurrir en las emisiones de CO₂, lo que implica que la desalinización no tiene por qué tener asociadas dichas emisiones.

12 Recomendaciones

Se recomienda que en todos los proyectos de plantas desalinizadoras se deban hacer los estudios de impacto ambiental correspondientes y establecer las medidas de mitigación necesarias.

Esta tecnología de desalinización de agua salobre o de mar es una opción real que se utiliza en muchos países del mundo, produciendo agua para consumo humano o procesos industriales, y para cultivos de alto valor comercial en los procesos de destilación y de membranas. El aprovechamiento de la energía solar directa para desalinizar agua es una opción para comunidades rurales o con baja población. Siendo la energía el factor que más influye en el costo del agua desalinizada, se han hecho grandes esfuerzos por utilizar fuentes de energía no convencionales como la solar directa o el viento, en forma aislada o combinada con fuentes tradicionales como el Diesel o la electricidad.

En una planta desaladora, sus impactos ambientales asociados se deben al elevado consumo energético (emisiones de CO₂, SO₂ y NO_x), vertido de efluentes cargados de un contenido salino superior al del equilibrio circundante, y el impacto visual y acústico de las instalaciones y tuberías necesarias. Es necesario realizar un análisis del ciclo de vida (ACV) de ambas soluciones para realizar un análisis más profundo con cifras que permitan un juicio justo de ambas alternativas.

Finalmente, la reutilización de aguas residuales debe ser promovida intensamente porque permite cubrir en parte la demanda de agua para usos de baja calidad requerida en áreas urbanas. Además, la regeneración de toda agua previamente degradada desde el punto de vista ambiental es siempre viable.

13 Bibliografía

- AL-Sahali, M. (2007). *La evolución de los procesos de desalación térmica: diseño, energía y cuesta aspectos*. *Diario de desalinización*. Vol. 214, pp. 227-240.
- AL-SOFI, M. (2001). desalación de agua de mar - SWCC experiencia y visión. *Desalinización*. pp. 121-139.
- AMTA. (2012). La mejora de las aguas de los Estados Unidos a través de la membrana y Tratamiento La desalación. Los costos de desalinización de membrana [en línea]. *World Wide Web* : <http://www.amtaorg.com/wp-c>.
- ARREGUÍN, F. (2000). Desalinización del agua. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XV, núm. 1, pp. 27-49.
- Belfort, G. (1984). *Procesos de membrana sintética, fundamentos y aplicaciones de agua*. Nueva York: Ed. Académico, pp. 287-296.
- BERMÚDEZ, A. y. (2008). *Desalación M. La energía renovable en Baja California Sur, México*. *Diario de Desalinization. La desalinización*. . México. : Vol. 220, pp. 431-440.
- Carrier. (1980). *Manual de aire acondicionado*. Marcombo S.A. isbn 84-267-0115-9.
- CETENMA. (2008). *Vigilancia tecnológica para la energía y el medio ambiente*. Centro Tecnológico de la Energía y el Medio Ambiente, 2008 [en línea]. Fecha de consulta: enero de 2011. : Disponible para World Wide Web: <http://www.ctmedioambiente.es>.
- Cipollina, A. (2005). *Incremento de la eficiencia en las plantas de desalinización térmica, haciendo coincidir la destilación térmica y solar: El análisis teórico* *Diario de desalinización. La desalinización*. Vol. 183, pp. 127-136.
- CONAE. (2007). Programa de Calentadores Solares de Agua en México (PROCALSOL). *Secretaría de Energía. México, DF*, [en línea]. Disponible para la World Wide Web : www.conae.gob.mx/.../sp_Programa_de_Calentadores_Solares_de_Agua_Mexico.pdf , Recuperado en junio.
- Cruz. ((2014)). *Curso de Sistemas de Potabilización con Clarificadores de Contacto*. Universidad del Valle Facultad de Ingeniería Área de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Disponible en https://campusvirtual.univalle.edu.co/moodle/pluginfile.php/655406/mod_.
- DÉVORA, G. (2007). *Desalinización de agua de mar, una estrategia para detonar el desarrollo del noroeste de México*. . Los acuíferos costeros: retos y soluciones. Vol. 1, pp. 1025-1034.

- Einav, R. H. ((2002)). *The footprint of the desalination processes on the environmental*. . Desalination 152, 141-154.
- Fariñas, M. (2005). *El coste del agua producida por las grandes desaladoras de agua de mar en España*. Ingeniería y territorio. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.: N° 72. Tercera época. Págs. 62 a 67.
- FERNÁNDEZ, J. y. (2003). *Destilación solar de agua de mar en México 1983-2003*. México, D.F.: Instituto de Ingeniería, 2005.
- Iguarán, I. D. (2004). Diagnóstico sobre el suministro de agua
- Khawaji, A. (2008). *Los avances en las tecnologías de desalinización de agua de mar*. . Diario de desalinización. Vol. 221, pp. 47-69.
- L., D. B. (1993). *Métodos e técnicas de tratamiento de agua. Volumen II*. Río de Janeiro, Brasil. : Editorial Novos Diálogos.
- L., D. B. (1993). *Métodos e técnicas de tratamiento de agua. Volumen II*. . Río de Janeiro, Brasil. : Editorial Novos Diálogos.
- LECHUGA, J. (2007). Análisis de los Procesos para desalinización de agua de mar aplicando la Inteligencia Competitiva y Tecnológica. . *Revista Académica de la FI-UADY. Vol. 11, núm. 3*, pp. 5-14.
- MEDINA, J. (2000). *Desalinización de aguas de mar y Salobres en ósmosis inversa*. Madrid: Editorial Mundi Prensa, 799 pp.
- Morton, A. C. (1998). *Environmental impacts of seawater distillation and reverse osmosis processes, Desalination*. pp. 1-10.
- NOGUEIRA, C. (2011). *El ciudadano 7.000 millones*. Madrid: Ediciones El País, S.L., España.
- OMS. (2007). *Desalinización para el Suministro de agua potable segura. Guía de los Aspectos ambientales y de salud aplicables a la desalinización*. Ginebra.
- PORTA, M. R. (2002). *Sistema de desalación solar de agua de mar para riego eficiente en un módulo de cultivo*. . Ingeniería Hidráulica en México. : Vol. 17, núm. 2, pp. 55-64.
- Ruiz Mateo, A. ((2010)). *Curso de Proyecto y Construcción de Emisarios Marinos*. . Málaga. : Septiembre.
- S., J. (2004). Promoción de la Salud y Prevención de la Enfermedad. 2ª edición. Bogotá.: Editorial Panamericana.
- SARTORI, G. (2003). La tierra explota. Madrid .

- TORRENT, A. (2011). *Desalinización por electrodiálisis reversible. . Características del Proceso y Casos Prácticos .*
- Torres Corral, M. ((octubre 2004)). *Avances Técnicos en la Desalación de Aguas*. Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).
- VALENCIA, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Bogotá: Editorial McGraw-Hill.
- VALERO, A. (2001). VALERO, A. *La desalinización como alternativa al plan hidrológico nacional*. España: Universidad de Zaragoza y el Centro de Investigación de recursos y Consumos Energéticos (CIRCE).
- Wangnick, K. (2000). *IDA Worldwide Desalting Plants Inventory*. Report No. 16, IDA.

Para la búsqueda mediante recursos electrónicos se han utilizado:

- Diferentes buscadores como: Google, Terra, Lycos, AOL Search, entre otros;
- Revistas electrónicas como Science Direct, Water Science and Technology, Pubmed, etc.
- Páginas de Internet de especialistas en la materia, de las que se ha obtenido información de la biblioteca que tienen publicada en ella.
- Documentación de cursos nacionales impartidos sobre desalación de agua de mar.
- Publicaciones de los congresos nacionales e internacionales de desalación
 - <http://www.lenntech.es/procesos/mar/general/desalacion-puntos-clave.htm#ixzz4OmySGHR0>
 - http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000300002&lang=pt
 - <http://www.sostenibilidad.com/desalacion-agua-por-osmosis-inversa>
 - <http://www3.aguasantofagasta.cl/desalacion.html>
 - <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia26/HTML/articulo04.htm>