

LENIN ALBERTO HERRERA

Ingeniero químico, Universidad del Zulia (LUZ), 1973. Especialización en Ingeniería de Gas, LUZ, 1974-1976. M.Sc. Environmental Health Engineering, Universidad de Texas, Austin, 1981. Jefe de la Sección de Proyectos Especiales del Instituto de Investigaciones Petroleras de LUZ, 1982-1988. Secretario de LUZ, 1988-1992. Presidente del Instituto para la Conservación y Control de la Cuenca del Lago de Maracaibo, 1994-1999. Presidente de la empresa: Ingeniería, Estudios y Proyectos Ambientales (INESPA), 1999-2012. Profesor titular de LUZ, adscrito al Centro de Investigación del Agua de LUZ. Profesor de la Universidad Rafael Urdaneta, Escuela de Ingeniería Química. Docencia e investigación en las áreas de termodinámica aplicada, ecología y contaminación, ingeniería ambiental, tratamiento físico-químico de aguas, tratamiento biológico de aguas residuales, tratamiento de aguas de producción petroleras, química de producción petrolera y estudios de impacto ambiental. Cuenta con más de ochenta trabajos entre publicaciones arbitradas, tesis de pregrado y posgrado, presentaciones en congresos y simposios. Ha participado en más de cien estudios y proyectos en las áreas de su competencia.

capítulo 5.

*Aprovechamiento de las
aguas marinas, salinas y salobres*

LENIN ALBERTO HERRERA

CONTENIDO

- 5.1.** El aprovechamiento de las aguas marinas, estuarinas y salobres continentales *pág.* 169
 - 5.2.** Opciones tecnológicas para desalinizar el agua *pág.* 170
 - 5.3.** La desalinización en Venezuela *pág.* 181
- Referencias *pág.* 185

5. 1. EL APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS MARINAS, ESTUARINAS Y SALOBRES CONTINENTALES

- 1 La población mundial ha crecido en los últimos cien años desde 1,65 millardos hasta 7 millardos, que es la población actual, y cuyo ímpetu de aumento ha tendido a estabilizarse y mantenerse en lo que va del siglo XXI. Este crecimiento ha impuesto demandas progresivas a las fuentes de agua dulce existentes, superficiales y subterráneas. Por ello, el agua susceptible de ser potabilizada o ajustada su calidad para usos industriales o riego, por medios convencionales, se ha convertido en un invaluable recurso.
- 2 El agua cubre el 75% de la superficie terrestre y las aguas marinas, salinas y salobres representan cerca del 97,5% de toda el agua en el planeta. Considerando la tendencia del crecimiento poblacional y la distribución no uniforme de las fuentes de agua dulce sobre la tierra, urge pensar en el aprovechamiento de ese elevado porcentaje de agua salina o salobre disponible. Algunas cifras aportadas por las Organización de las Naciones Unidas en el *World Water Development Report* refuerzan la afirmación anterior. Se espera que para el año 2025 más del 50% de las naciones del mundo enfrentarán crisis por la disponibilidad de agua (NACIONES UNIDAS, 2003).
- 3 Hoy se hace imperativo explorar nuevas fuentes de agua dulce. Las plantas de desalinización, son una alternativa válida y viable en muchos países y regiones del mundo, para obtenerla a partir de aguas salinas y salobres; no obstante, para que la instalación de una planta desalinizadora sea factible, debe cumplirse, al menos, con los siguientes criterios (DANOUN, 2007):
 - Disponer de un sitio adecuado, con suficiente terreno, zonificación industrial y alejado de hogares y escuelas para evitar contaminación sonora, que se encuentre cerca de la fuente de agua salada o salobre, de manera que la tubería de conducción no sea muy larga, para que sea de bajo costo.
 - Que el agua sea de buena calidad; por ejemplo, que la concentración de sólidos suspendidos sea baja, así como el contenido de materia orgánica y aceites.
 - Que se disponga de una fuente de potencia o suministro de combustibles.
 - Disponer de un plan de manejo de la salmuera residual, considerando la disposición sustentable y reúso potencial de la salmuera de rechazo, para minimizar los impactos potenciales de la alta salinidad y alcalinidad de la salmuera sobre la vida acuática, y ser ambientalmente compatible.
 - Fijar una posición adecuada para la entrada y salida del agua de alimentación y rechazo, hacia y desde la planta de desalinización.
- 4 A lo largo de la historia, muchos investigadores se han planteado la desalinización del agua como una opción para enfrentar la escasez del agua dulce, entendiendo por desalinización el proceso mediante el cual se remueven las sales que existen en el agua salada, con el fin de obtener agua de menor salinidad y, por tanto, de mejor calidad para cubrir las necesidades del ser humano. A objeto de tener una idea clara de la clasificación de las aguas, de acuerdo con su concentración de sales, se presenta la tabla 5.1.
- 5 Las aguas con concentraciones de sales disueltas menores a 3 mg/l son destinadas a procesos industriales de producción de alimentos, medicamentos, aplicaciones médicas, reproducción in vitro, agua para calderas y turbinas, y aplicaciones analíticas,

entre otras. El agua dulce puede conseguirse naturalmente con la concentración de sales indicadas y, para su potabilización, solo requiere los tratamientos convencionales. El resto de la clasificación corresponde a aguas estuarinas, subterráneas y marinas.

TABLA 5.1 Clasificación de las aguas según su concentración de sales disueltas

Fuente: Medina (2000)

<i>Tipos de agua</i>	<i>concentración de sales disueltas (mg/l)</i>
Ultra pura	0,03
Pura	0,3
Desionizada	3
Dulce	< 1.000
Salobre	1.000 – 10.000
Salina	10.000 – 30.000
Marina	30.000 – 50.000

- 6 En Venezuela disponemos de una gran gama de calidades de agua de acuerdo con su concentración de sales disueltas. De ellas, las que requerirían tratamientos especiales de desalinización están en los estuarios (estuario de Maracaibo y delta del Orinoco), lagunas costeras, aguas subterráneas infiltradas por las cuñas salinas, como es el caso del acuífero de Maracaibo en la zona del municipio Mara y, evidentemente, las aguas marinas que se extienden a lo largo de 4.006 kilómetros de costas continentales y 1.040 kilómetros de costas insulares (MOREAU, 2007). Adicionalmente, se cuenta con el lago de Valencia que tiene cerca de 350 km² y un volumen estimado de agua de 6,3 km³, pero la calidad de sus aguas (altas concentraciones de sulfatos y dureza magnésica) imponen la necesidad de tratamientos especiales para su potabilización, pudiendo ser la desalinización una alternativa tecnológica para el aprovechamiento del agua a pequeña escala.
- 7 Desde hace muchos años, en el mundo se han instalado plantas de desalinización. Las estadísticas publicadas (PACIFIC INSTITUTE, 2007) indican que desde 1945 hasta el 2004 se habían instalado 10.402 plantas desalinizadoras con una capacidad acumulada de 35.627.374 m³/día; y en el año 1999, en 100 países la capacidad instalada era de 16.521.319 m³/día, de los cuales Venezuela tenía instalada una capacidad de 19.629 m³/día, cifra que revela que en el país disponemos de una experiencia en la instalación y operación en este tipo de plantas, lo cual puede ser aprovechado para enfrentar en el futuro los retos en esta materia de tanto valor estratégico, considerando que la tecnología es cada vez más accesible y que la fuente es prácticamente inagotable.

5. 2. OPCIONES TECNOLÓGICAS PARA DESALINIZAR EL AGUA

- 8 Las tecnologías para la desalinización, hoy en día, ponen a disposición de la humanidad un potencial para enfrentar la escasez de agua potable mediante la transformación de una fuente prácticamente inagotable como lo es el agua marina, así como también de inmensas cantidades de aguas salobres, existentes en estuarios y formaciones subterráneas. Los avances tecnológicos de los últimos años han convertido la desali-

nización en una opción factible para el suministro de agua dulce. Sin embargo, persisten aspectos económicos, ambientales y sociales que deben ser tomados en cuenta al momento de optar por esta alternativa para el suministro de agua para diferentes usos. A continuación, se hará una breve descripción de los procesos de desalinización disponibles y probados a gran escala y, seguidamente, se abordarán las consideraciones económicas y ambientales que limitan o condicionan el uso de dichas tecnologías.

5. 2. 1. TECNOLOGÍAS DE DESALINIZACIÓN

- 9 Los procesos de desalinización esencialmente están basados en el uso de la evaporación o la separación con membranas. Mediante estos, se remueven las sales y minerales solubles de las aguas marinas o salobres obteniendo agua potable y, como subproducto, salmuera. A continuación, se presenta una breve descripción de los procesos basados en tecnologías maduras.

5. 2. 1. 1. TECNOLOGÍAS TÉRMICAS

- 10 El principio fundamental de los procesos térmicos consiste en calentar el agua, más allá o cerca de su punto de ebullición, recolectar el vapor y enfriarlo para producir agua dulce. Entre estas tecnologías se cuenta con la Destilación Súbita Multietapas (DSM), la Destilación Multi efecto (MED) y la Destilación por Compresión de Vapor (ECD) (acrónimos corresponden a siglas en inglés).

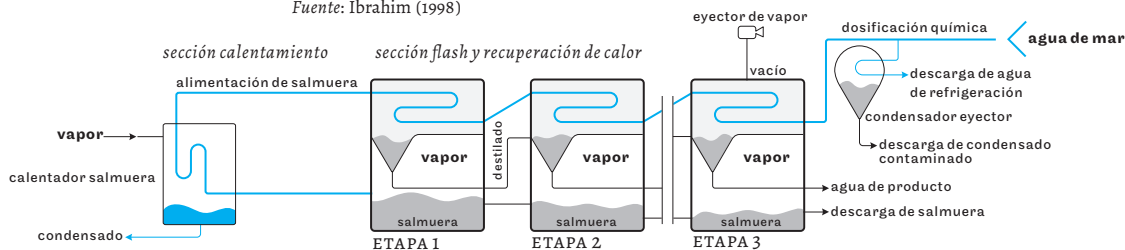
- 11 1). *Destilación Súbita Multietapas (DSM)*. Se calienta agua de mar o salobre en el calentador de salmuera (nota 1), mediante la condensación de vapor en un dispositivo donde el vapor de agua transfiere energía para calentar el agua de mar o un intercambiador de calor inicial por donde se hace circular el agua. Posteriormente, el agua de mar caliente se hace pasar a la primera etapa de ebullición, a una presión inferior en la cual se produce la evaporación súbita parcial del agua. En cada etapa, la reducción de la presión en la corriente líquida va acompañada de la producción de vapor por evaporación súbita o *flash*. Este proceso se repite en una serie de etapas sucesivas, donde al ser menor la temperatura de la alimentación, es mayor el grado de vacío.

(nota 1)

Salmuera: agua de rechazo de los procesos de desmineralización, que consiste de una solución enriquecida por las sales que han sido retiradas del agua desmineralizada.

FIGURA 5.1 Diagrama de la destilación súbita multietapas

Fuente: Ibrahim (1998)

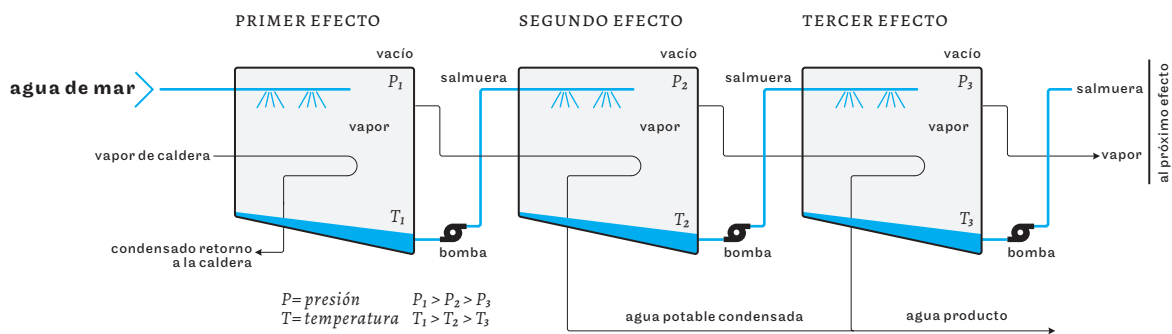


- 12 El vapor producido se condensa en un haz o banco de tubos por donde circula el agua de mar hacia el calentador de salmuera, recogiendo el condensado como agua producto en unas bandejas especiales y dirigiendo el resto hacia la siguiente etapa, en donde al existir una presión inferior se repite el ciclo. El condensado de todas estas pequeñas producciones es la capacidad global de la planta (ALARCÓN, 2005). En la figura 5.1 se muestra un esquema del proceso.

- 13 II). *Destilación Multiefecto (MED)*. Este proceso, al igual que en el DSM, consiste de una serie de etapas sucesivas cuyas temperaturas decrecen en el sentido del flujo del agua, lo que permite la reducción del punto de ebullición del agua de mar de alimentación sin tener que calentarla después del primer efecto. En este sistema, el agua de mar entra al primer efecto (proceso de calentamiento e intercambio de calor) y alcanza el punto de ebullición en contacto con una serie o haz de tubos por los que circula vapor de agua proveniente de una caldera.
- 14 El agua de mar es pulverizada y distribuida sobre la superficie de los tubos evaporadores, alcanzando así su evaporación. El vapor que circula por los tubos es condensado posteriormente para ser recirculado a la caldera.
- 15 En el primer efecto solo se evapora una parte del agua salada vertida sobre ellos; el agua no evaporada alimenta al segundo efecto, en el que nuevamente se vierte sobre un haz de tubos que contienen vapor caliente que se produjo en el primer efecto, que se condensa posteriormente, transformándose en agua desalinizada e intercambiando calor con el agua vertida; una parte de ella se transforma en vapor, que luego se envía al siguiente efecto.
- 16 Típicamente, las plantas MED disponen de un número de efectos entre 8 y 16, con el fin de aprovechar mejor la energía. Parte de la condensación del agua potable se logra intercambiando calor con los tubos que conducen el agua de mar cruda, produciendo un calentamiento previo al evaporador del primer efecto (IBRAHIM,1998).

FIGURA 5.2 Diagrama de la destilación multiefectos

Fuente: Ibrahim (1998)

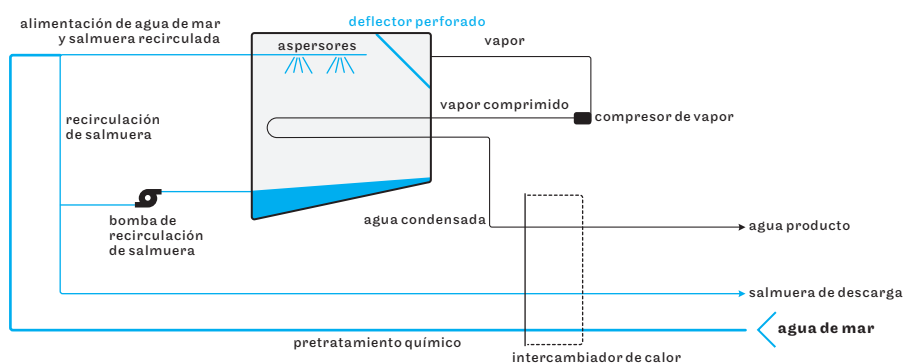


- 17 El Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de España (CIEMAT) ha venido desarrollando proyectos de investigación para mejorar la eficiencia del proceso MED, aprovechando la energía solar mediante el uso de colectores solares de alta eficiencia. Entre estos proyectos está el AQUASOL, iniciado en el año 2002, que intenta mejorar el sistema de captación solar para calentar el agua de mar en la primera fase del proceso, incorpora sistemas de ahorro energético, uso de gas natural y recuperación de la sal. El éxito de este tipo de proyectos representa una posibilidad para Venezuela, debido a varios factores: la necesidad de disponer de agua dulce en sitios alejados de fuentes superficiales; la disposición de gas natural; y la intensidad de la irradiación solar durante todo el año, tal como las islas que se agrupan en la denominada región insular o en la Guajira (ALARCÓN, 2005).

- 18 III). *Destilación por Compresión de Vapor* (ECD). En este proceso, la energía necesaria para evaporar el agua proviene de la compresión suministrada al vapor, en lugar del intercambio de calor directo con el vapor producido en una caldera.
- 19 Se utilizan dos métodos principales para condensar el vapor y producir suficiente calor para evaporar el agua de mar aportada, a saber, compresión mecánica o eyección de vapor. En el primer caso, la compresión mecánica se alimenta eléctricamente permitiendo obtener agua desmineralizada utilizando únicamente energía eléctrica. Este proceso utiliza un compresor que crea un vacío en el recipiente desde donde aspira el vapor existente, el cual es comprimido de nuevo y posteriormente condensado en el interior del haz de tubos dispuestos en la carcasa. El agua de mar pulverizada cae sobre los tubos vaporizándose parcialmente.

FIGURA 5.3 Diagrama de la compresión de vapor mecánica

Fuente: Ibrahim (1998)



- 20 El sistema de eyección, que no es más que un tipo simplificado de compresor sin partes móviles, genera un chorro de vapor que pasa a través de un dispositivo tipo venturi (nota 2), y extrae el vapor de agua del interior del recipiente, creando una baja presión en él que permite comprimir el vapor extraído. Esta mezcla se condensa en la pared de los tubos suministrando energía (ΔH de condensación) para evaporar el agua de mar al aplicarla en la otra superficie de los tubos del recipiente (IBRAHIM,1998).

(nota 2)

Venturi: es un ducto cerrado a través del cual pasa un fluido que disminuye su presión al aumentar su velocidad después de pasar por una zona de sección transversal menor.

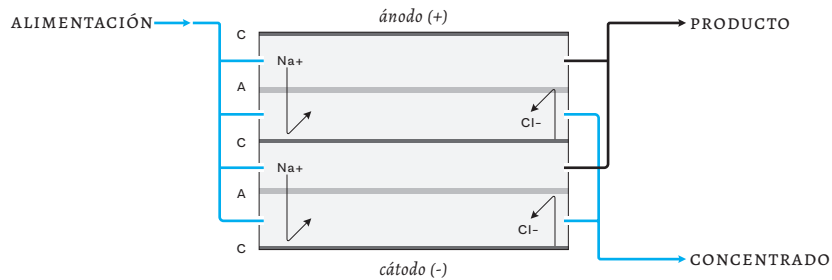
Si en el punto de menor sección se coloca otro ducto, se produce la aspiración del fluido que este en el exterior, a medida que circula el fluido por el primero.

- 21 **5. 2. 1. 2. TECNOLOGÍAS DE MEMBRANAS**
- Estas tecnologías se desarrollaron a partir de la observación de procesos naturales que ocurren normalmente en las células vivas, como son los casos de la diálisis y la ósmosis. Entendiendo a la primera como el proceso de separación de los constituyentes de una solución, a través de una membrana selectiva, que es capaz de permitir el paso de unas moléculas y no de otras. Por otra parte, la ósmosis es el proceso mediante el cual un disolvente se difunde a través de una membrana semipermeable en el seno de una solución más concentrada con el objeto de igualar las concentraciones a ambos lados de dicha membrana. Los procesos de desalinización, mediante el uso de membranas, son esencialmente la electrodiálisis y la ósmosis inversa. A continuación, se presenta una descripción más detallada de estas tecnologías.
- 22 I). *Electrodiálisis* (ED). Es un proceso de separación electroquímica en el cual los iones son transferidos a través de membranas selectivas (aniónicas y catiónicas) desde

una solución menos concentrada a otra más concentrada, como consecuencia de una diferencia de potencial (voltaje de corriente continua), que es el encargado de invertir el potencial químico, el cual normalmente permite el flujo de iones desde una solución más concentrada a otra de menor concentración. Las membranas actúan como barreras al paso de los iones; las catiónicas permiten el paso de iones cargados positivamente (cationes), las aniónicas permiten el paso de los iones negativos (aniones). Ambas son conductoras de electricidad e impermeables al agua.

FIGURA 5.4 Diagrama de la electrodiálisis (ED)

Fuente: IONICS (2003)



- 23 Uno de los problemas que hay que tener en consideración en los sistemas de electrodiálisis, es la obstrucción de las membranas y la formación de incrustaciones. La acumulación de iones (Ca^{++}), sólidos disueltos, y HCO_3 (bicarbonatos), en el concentrado de sales, puede conducir a la formación de incrustaciones de carbonato de calcio. Por otra parte, también es frecuente la deposición de sulfato de calcio, ya que la solubilidad de esta sal es solo ligeramente sensible al pH (IBRAHIM,1998). El control de los fenómenos de incrustaciones y la obstrucción de las membranas, normalmente se previene mediante la dosificación de aditivos químicos; por ejemplo, para prevenir las incrustaciones de sales de calcio se utiliza el hexametáfosfato sódico.
- 24 Con el fin de evitar estos problemas de formación de incrustaciones y la obstrucción de las membranas, se ha mejorado la tecnología de la ED evolucionando hacia la electrodiálisis reversa (EDR). Estos sistemas están diseñados para desmineralizar el agua, minimizando el uso de productos químicos durante la operación normal, lo cual se logra con la inversión de la polaridad de las pilas de electrodiálisis entre 15 a 30 minutos. Esto hace que se invierta la dirección del movimiento de los iones dentro de la pila de membranas, promoviendo la remoción de la incipiente película de suciedad y de sales incrustantes de las membranas. En la figura 5.5 se muestra un esquema del proceso EDR.
- 25 II). Ósmosis Inversa (OI). Este proceso es exactamente el inverso a la ósmosis natural. En él se logra que el agua pase a través de una membrana semipermeable, desde una solución de alta salinidad a otra de menor concentración. Por tanto, el proceso es usado para separar el agua de alta salinidad del agua de salinidad baja, generándose al final del proceso dos corrientes: una de agua más salada que el agua de alimentación (concentrado), y otra corriente de agua de baja salinidad (permeado). La separación

se logra haciendo pasar el fluido a través de una membrana semipermeable a una determinada presión y velocidad. La aplicación de la presión es la fuerza impulsora que permite invertir el potencial químico y hace posible el paso del agua a través de la membrana. En la figura 5.6 se ilustra el proceso de transporte de fluidos en la membrana de ósmosis.

FIGURA 5.5 Diagrama de la electrodiálisis reversa (EDR)

Fuente: IONICS (2003)

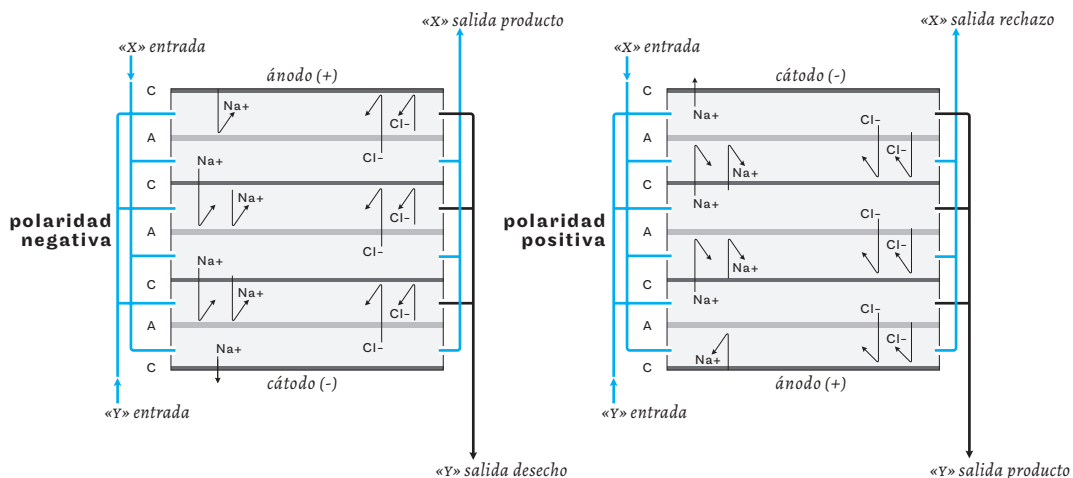
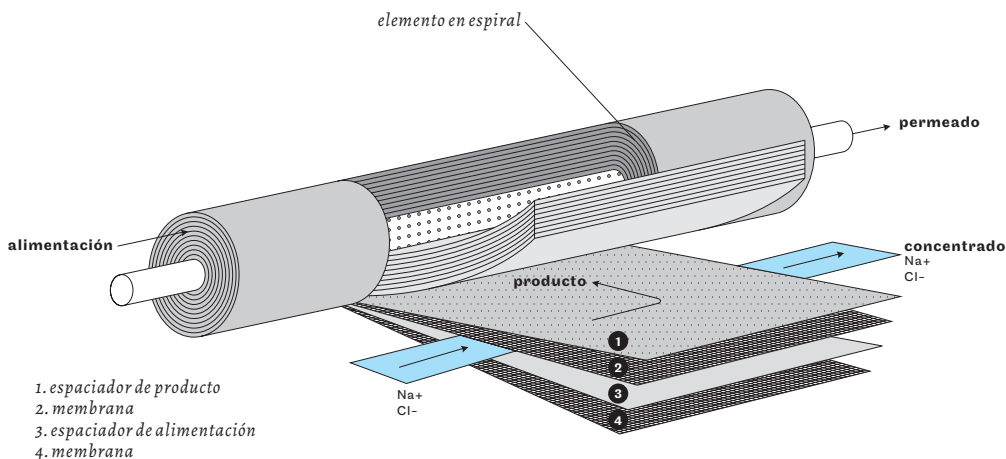


FIGURA 5.6 Flujo de agua y sales a través del elemento de ósmosis

Fuente: IONICS, 2003



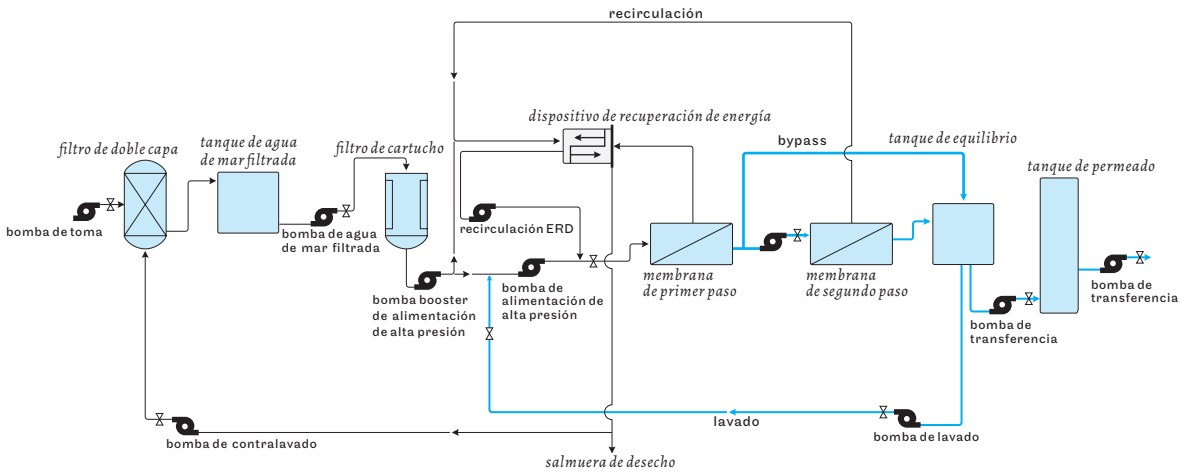
- 26 La presión que se debe aplicar para lograr los fenómenos de transporte de masa que se manifiestan en la ósmosis inversa, depende de la concentración del agua de alimentación. Para aguas salobres, el intervalo habitual de presiones está entre 5 y 25 bar (nota 3), y para aguas marinas, el intervalo está entre 55 y 70 bar. En la actualidad, existen dispositivos de recuperación de energía centrífugos e isobáricos que permiten aprovechar la energía de presión de la corriente de concentrado o salmuera. En la figura 5.7, página 176, se muestra un diagrama de flujo del proceso de desalinización con ósmosis inversa, incluyendo el dispositivo recuperador de energía.

(nota 3)

1 bar = 0,98 atmósfera = 14,5 psi.

FIGURA 5.7 Diagrama de flujo del proceso de ósmosis inversa (O1)

Fuente: Flowserve Corporation (2012)



27 Otro aspecto importante del proceso de ósmosis inversa es el relativo a las membranas, que son una capa delgada de polímeros de varios micrómetros (1 millonésima de metro) de espesor y que pueden ser de varios tipos, clasificadas en dos grandes grupos, a saber, membranas polisacáridos o celulósicas y membranas no-polisacáridos o de polímeros sintéticos (SINCERO, 2003). En el primer grupo, están los tipos siguientes:

- Membrana de acetato de celulosa (AC)
- Membrana de butirato acetato de celulosa (BAC)
- Membrana de triacetato de celulosa (TAC)

28 En el segundo grupo, están los tipos de membranas siguientes:

- Membrana poliamida NS-100
- Membrana poliamida PA-100
- Membrana poliamida PA-300
- Membrana poliamida NS-300
- Membrana poliamida FT-30

29 Las membranas de celulosa tienen la ventaja de ser menos costosas, resistir los efectos de agentes oxidantes (cloro, cloraminas, bromo, ozono, etc.) y ser más resistentes a las incrustaciones y a la obstrucción, pero requieren presiones más elevadas que las membranas de poliamidas. Además, son menos estables a los cambios de pH y son afectadas por la acción de microorganismos. Las membranas de poliamidas requieren menores presiones de operación para lograr los mismos niveles de desmineralización, son más tolerantes a los cambios de pH y más resistentes a la degradación biológica. Pero son más susceptibles a la obstrucción, y además, son intolerantes a los agentes químicos oxidantes. Por lo tanto, en los sistemas con este tipo de membranas se requieren rigurosos procesos de pretratamiento físico-químico del agua de alimentación para garantizar su vida útil. Usualmente, se estima que esta es de cinco años, si mantienen un régimen estricto de mantenimiento.

- 30 Por tanto, es importante acotar que la utilización de agentes químicos para prevenir o mitigar los efectos de incrustaciones, acción de microorganismos, entre otros, representan desventajas en los procesos de desalinización de aguas salinas y salobres, desde las perspectivas económicas y ambientales.

5. 2. 2. IMPLICACIONES ECONÓMICAS DEL USO DE TECNOLOGÍAS DE DESALINIZACIÓN

- 31 Los procesos térmicos de desalinización descritos anteriormente son considerados tecnológicamente maduros, y en el caso de los procesos de membranas, se siguen realizando inversiones en el área de investigación y desarrollo con el fin de hacerlos más eficientes desde el punto de vista termodinámico (THE NATIONAL ACADEMIES OF USA, 2008), y consecuentemente, desde el punto de vista económico y ambiental. Sin embargo, su aplicación para producir agua potable para suministrar a la población, a pequeña, mediana o gran escala, sigue siendo limitada por los costos de inversión de capital y de operación. En el caso de Venezuela, contra su aplicación conspira una cultura en la administración pública que no asume el mantenimiento como una materia esencial para garantizar la confiabilidad operacional y proteger la inversión de capital; situación esta que puede expresarse de manera muy sencilla, tomando prestada la sentencia planteada por el Dr. Gustavo Rivas Mijares hace algunas décadas: «La palabra mantenimiento es mitológica en Venezuela». Hoy más que nunca esa sentencia tiene vigencia. Por ello, no solo son importantes las variables económicas y técnicas al momento de tomar decisiones sobre la instalación de sistemas de desalinización, sino también las socioculturales y políticas que, a la larga, afectarán la confiabilidad operacional y el uso eficiente de los recursos.
- 32 Considerando que la desalinización de aguas salobres o marinas es ya competitiva frente a otras alternativas para localidades donde no existan fuentes superficiales de agua dulce cercanas, se recomienda evaluar la factibilidad de instalar plantas desalinizadoras para producir agua dulce si se dispone en las cercanías de cuerpos de aguas salobres o marinas bien sean superficiales o subterráneas, siempre que exista la posibilidad de disponer de personal que las opere y mantenga debidamente.
- 33 Estimar los costos de los procesos de desalinización del agua es una tarea compleja, dado que estos son influenciados por muchos factores, tales como la concentración de sales disueltas en el agua de alimentación, los requerimientos de calidad del agua producida, la ubicación de la planta con respecto a la fuente, las facilidades para disponer la salmuera residual, el costo de la electricidad, el costo de la mano de obra y el costo de químicos, entre otros aspectos. Sin embargo, se presentarán algunos ejemplos que servirán para ilustrar los costos asociados a la desalinización de agua para suministro a la población, para plantas de tamaños que van de 20.000 m³/d a 100.000 m³/d.
- 34 Con el fin de comparar los costos asociados a las tecnologías de desalinización térmica y de membranas, en la tabla 5.2. se presenta la comparación de costos totales en los procesos de desalinización para 100.000 m³/d de agua marina (1.160 l/s) en los Estados Unidos. Allí se observa que la tecnología de membranas es la de menor costo.

TABLA 5.2 Comparación de los costos totales ($\$/m^3$) para la desalinización de agua marina mediante ósmosis inversa, destilación súbita multietapas y destilación multiefecto, en plantas de 100.000 m^3/d de capacidad

Fuente: Global Water Intelligence (2007)

Costos totales	ósmosis inversa	destilación súbita multietapas	destilación multiefecto
Costos de capital anualizado	0,15	0,29	0,22
Mantenimiento y repuestos	0,03	0,01	0,01
Productos químicos	0,07	0,05	0,08
Mano de obra	0,10	0,08	0,08
Membranas	0,03	0,00	0,00
Energía térmica ¹	0,00	0,27	0,27
Energía eléctrica ($\$ 0,05/kWh$)	0,23	0,19	0,06
TOTAL ($\\$/m^3$)	0,61	0,89	0,72

¹ Los costos de energía térmica son elevados porque no se consideró la cogeneración o el uso de la energía residual

35 Un estudio realizado para determinar la factibilidad de suministrar agua a Santa Rita, estado Zulia (BERMÚDEZ, 2009), población que actualmente se abastece del embalse de Pueblo Viejo, consideró que, aun cuando dicha población se encuentra al final del sistema de distribución, y pese a la proliferación de tomas ilegales para usos no conformes y a la escasez de fuentes superficiales y subterráneas para sostener nuevos proyectos de expansión –los cuales hacen más crítica la situación–, la propuesta presenta esencialmente dos ventajas frente a la situación actual: I) Santa Rita es una población ribereña del lago de Maracaibo, por tanto, tiene acceso directo a una fuente de agua salobre de inmensas proporciones; y II) se eliminarían, o por lo menos se disminuirían significativamente, las tomas ilegales. Para establecer la factibilidad de suministrar agua potable a la referida localidad, a partir del agua del lago, se consideraron las opciones de ósmosis inversa (OI) y la destilación súbita multietapas (DSM), y se establecieron las siguientes premisas:

- Capacidad instalada: 20.000 m^3/d (230 l/s).
- Vida útil: 30 años.
- Costo de la energía eléctrica: US $\$ 0,05/kWh$.
- Consumo de vapor: 125 kg/m^3 .
- Costo del vapor: US $\$ 1,466/MkJ$ (1.000.000 kilojoules).
- Costo de químicos: US $\$ 0,025/ m^3$.
- Costo de mano de obra para operación y mantenimiento: US $\$ 0,1/ m^3$ (DSM) y US $\$ 0,05/ m^3$ (OI).
- Vida útil de las membranas: 5 años.
- Costos de mantenimiento y repuestos: 1% anual del costo de la inversión de capital (DSM) y 2% anual (OI).

36 Los resultados de la evaluación se presentan en la tabla 5.3, donde se observa que los costos de inversión, operación y mantenimiento de la ósmosis inversa (OI) son menores que los de destilación súbita multietapas (DSM). Por tanto la producción de 1 m^3 de agua desalada son menores en el caso de la ósmosis inversa (OI).

- 37 Adicionalmente a esta evaluación comparativa de costos para las dos alternativas tecnológicas, se hizo una evaluación más detallada de los costos de la opción de O1, considerando los siguientes renglones:
- Costos indirectos de capital: intereses, ingeniería y contingencias.
 - Costos directos de capital: obras de captación de agua, desarrollo del sitio, sistema de pretratamiento, sistema de ósmosis inversa y sistema de postratamiento.
 - Costos de operación y mantenimiento: mano de obra, mantenimiento y repuestos, productos químicos, energía eléctrica y reemplazo de membranas.
- 38 El costo de producción de agua potable, a partir del agua del lago de Maracaibo, sería de 1,05 US \$/m³. Estos costos no toman en cuenta la parte correspondiente al manejo y disposición del concentrado (salmuera), y fueron estimados para el año 2009 con un precio por concepto de energía de 0,01 US \$/kWh. Los costos actuales de producción de agua potable por captación y potabilización de aguas superficiales, en la región, se aproximan a los 0,4 US \$/m³.

TABLA 5.3 Comparación de los costos totales para la desalinización de agua salobre para Santa Rita, estado Zulia

Fuente: Bermúdez (2009)

Costos totales	ósmosis inversa	destilación súbita multietapas
Inversión de capital (\$)	45.471.562,50	61.936.875,00
<i>Costos de operación y mantenimiento</i>		
Consumo de energía eléctrica (\$/año)	2.348.739,44	1.705.200,00
Consumo de vapor de agua (\$/año)	no aplica	2.750.015,53
Consumo de productos químicos (\$/año)	2.192.400	1.461.600,00
Mano de obra (\$/año)	333.380,81	681.953,13
Mantenimiento y repuestos (\$/año)	909.431,25	619.368,75
Costos totales de operación y mantenimiento (\$/año)	5.783.951,50	7.218.137,41

- 39 Un aspecto importante que se debe considerar es el de las economías de escala. En el caso de las tecnologías de membranas, las facilidades de desalinización exhiben un impacto por este aspecto en ambas aplicaciones, tanto para tratar aguas marinas como aguas salobres. Datos sobre los costos de capital de desalinización, en función del tamaño de la planta, indican que a medida que el tamaño se incrementa, desde 38.000 a 380.000 m³/d, los costos de capital, expresados por metro cúbico de agua producida, disminuyen en 20%. Cuando el agua de alimentación es salobre, también disminuyen a medida que la planta aumenta de capacidad, pero en un grado menor (< 10%) (THE NATIONAL ACADEMIES OF USA, 2008).
- 40 En el Informe del Consejo de Investigación de los Estados Unidos del año 2008 (THE NATIONAL ACADEMIES OF USA, 2008) se ilustran las tendencias en materia de costos en los procesos de desalinización. A continuación, sus conclusiones:
- Para lograr reducciones sustanciales en los costos de financiamiento de la desalinización, se requerirán reducciones sustanciales en los costos de energía y capital.
 - Para la desalinización de agua salobre, los costos de manejo de concentrado pueden variar enormemente de un proyecto a otro, y pueden competir con los de energía y de capital como uno de los componentes del costo total de desalinización,

dependiendo de las regulaciones ambientales existentes en la zona. Una alternativa viable para disponer las aguas de rechazo es la descarga al cuerpo de agua a través de difusores cuyo costo puede representar una fracción (<10%) de la inversión total del proyecto.

- Hay mejoras que se pueden hacer en la tecnología de las membranas actuales que reducirían la energía necesaria para desalinizar agua y, por tanto, ofrecer potencialmente importantes reducciones en el costo del proceso.
- La extensión de la vida de las membranas no promete generar un impacto significativo en los costos de desalinización.
- Los costos para producir agua desalinizada han caído en los años recientes, pero pueden incrementarse a futuro si el precio de la energía crece más rápido que la reducción de los costos derivados del mejoramiento de las tecnologías.
- La conservación y la transferencia de usos de bajo valor a usos de alto valor serán menos costosos que incorporar la desalinización como alternativa.

5. 2. 3. IMPLICACIONES AMBIENTALES DEL USO DE TECNOLOGÍAS DE DESALINIZACIÓN

- ⁴¹ A pesar del tiempo que ha transcurrido desde que se instalaron las primeras plantas desalinizadoras, en la actualidad hay una gran incertidumbre sobre los impactos ambientales de la desalinización y de sus efectos potenciales. Los más evidentes son: interferencias, colisiones y entrapamiento de los organismos acuáticos en los sitios donde los dispositivos de captación de agua salada son colocados; impactos ecológicos por los cambios en la calidad del agua producidos por la disposición de concentrados de sales, y el incremento de las emisiones de gases de invernadero como consecuencia del consumo de energía. En este punto es importante mencionar que las captaciones en cuerpos de agua superficiales también generan impactos ambientales significativos, como son el entrapamiento de organismos acuáticos, descargas de lodos procedentes de los sedimentadores y aguas de lavado de filtros, reducción de caudales de los ríos, especialmente en épocas de estiaje, etc.
- ⁴² De acuerdo con el Informe *Desalination Plants: Potential impacts of brine discharge on marine life* (DANOUN, 2007), los impactos ambientales de las plantas de desalinización pueden variar dependiendo de: la localización de la planta; la localización de la captación y descarga de la planta; el tipo de proceso de desalinización; y el método de descarga utilizado (canal o tubería). Los impactos adicionales que se deben mencionar y que deben ser considerados al momento de decidir sobre la instalación de una planta desalinizadora son:
- Impacto debido al uso del área costera. Para la construcción de las facilidades de desalinización, normalmente se requiere disponer de una extensión de terreno próxima al sitio de captación.
 - Generación de ruido como consecuencia del funcionamiento de bombas de alta presión y turbinas recuperadoras de energía.
 - Incremento de la temperatura del agua. La descarga de salmuera puede causar polución térmica cerca de la descarga, afectando los organismos acuáticos en sus diferentes estadios de crecimiento.
 - Impacto sobre la vida acuática, primordialmente causado debido a descargas, con casi el doble de la concentración de sales y de alcalinidad total. La descarga de

esta salmuera concentrada tiene la capacidad de matar organismos acuáticos y en general causar daños a la vida silvestre.

- Elevada concentración de boro en el agua producida. Esto exige un monitoreo cuidadoso por cuanto se ha determinado que el tratamiento de agua marina por un sistema de OI de un paso produce permeado con una concentración de boro que excede el valor de referencia (0,05 mg/l) establecido por la Organización Mundial de la Salud (THE NATIONAL ACADEMIES OF USA, 2008).
- Manejo y disposición de la salmuera. La desalinización en zonas alejadas de la costa plantea un problema serio que puede conducir a la inviabilidad del proceso por razones ambientales y, en consecuencia, económicas.

5. 3. LA DESALINIZACIÓN EN VENEZUELA

- 43 En Venezuela, la desalinización de agua no ha sido considerada por el Estado como estratégica en su gestión, a pesar de que el país cuenta con fuentes prácticamente inagotables de aguas marinas y salobres de fácil acceso y cercanas a zonas pobladas. Seguramente esta visión ha sido el resultado de una tradición y de contar con suficientes fuentes de aguas superficiales y subterráneas de baja salinidad susceptibles de ser potabilizadas mediante sistemas convencionales de tratamiento, caracterizadas así de acuerdo al Decreto número 883. A pesar de ello, para el año 1999, de acuerdo al Pacific Institute (PACIFIC INSTITUTE, 2007), Venezuela ocupaba el puesto 51 de los 100 países considerados, con una producción de 16.629 m³/d, de un total de 16.521.319 m³/d, esto representaba el 0,1% del total acumulado. La mayor parte de la producción de agua desalinizada para esa época iba destinada a cubrir la demanda industrial, como es el caso de la planta generadora de electricidad Planta Termoeléctrica del Centro, ubicada en Punta Morón, así como instalaciones petroleras, embotelladoras de bebidas y laboratorios farmacéuticos, entre otras.
- 44 El uso de aguas marinas y estuarinas como fuentes de suministro de agua a la población no ha sido considerado, salvo en algunas zonas aisladas del continente y en pequeñas islas, como la isla el Gran Roque en el archipiélago de Los Roques. La mayoría de esos casos han sido iniciativas locales o privadas, no parte de una política integral en la gestión del agua.
- 45 Debido a la carencia de registros de los sistemas de desalinización instalados en el país, se ha apelado a las comunicaciones personales y se ha logrado obtener información extraoficial sobre plantas de desalinización que sirven a pequeñas poblaciones. En la tabla 5.4, página 182, se muestra la información obtenida.
- 46 Como se indicó anteriormente, para el suministro de agua de procesos existen instalaciones de EDR y OI en diferentes industrias, tales son los casos de la Refinería de Puerto La Cruz (5.470 m³/d), Mejorador Petropiar (6.560 m³/d), Termozulia I y II (4.750 m³/d), Planta Termoeléctrica del Centro, Planta Termoeléctrica Tocoa, y algunas plantas embotelladoras de cerveza, malta y refrescos, así como laboratorios farmacéuticos. Como se puede observar, en la actualidad la capacidad instalada en Venezuela supera significativamente los niveles reportados en el año 1999. Adicional a estas plantas, está en ejecución el proyecto de la Planta de Ósmosis Inversa del Complejo Refinador de Paraguaná, con una capacidad proyectada de 74.880 m³/d.

47 Un aspecto que vale la pena mencionar es el relativo a la confiabilidad operacional de los sistemas instalados. De acuerdo con las entrevistas sostenidas y los informes revisados, se pudo determinar que cuando los diseños incorporan los dispositivos y facilidades adecuadas para el pretratamiento requerido en cada caso, y se siguen los protocolos de mantenimiento, la duración de las membranas alcanzan la vida útil prevista por el suplidor y los niveles de calidad de agua esperados, por tanto, la confiabilidad operacional de los sistemas de desalinización ha sido elevada. Pero en aquellos casos en los que no se siguen los protocolos de pretratamiento y mantenimiento, hay deficiencias en el diseño de los dispositivos y métodos de captación del agua de alimentación, se presenta baja confiabilidad operacional e interrupciones continuas y prolongadas en el servicio. De hecho, en la actualidad muchas instalaciones turísticas de la isla de Margarita han preferido instalar plantas desalinizadoras de agua marina, en lugar de estar expuestos a la baja confiabilidad del suministro de agua potable, o a la alternativa de cubrir las deficiencias mediante el costoso suministro de agua de dudosa calidad, en camiones cisternas.

TABLA 5.4 Plantas desalinizadoras instaladas en Venezuela para suministro de agua potable

Fuente: Comunicaciones personales

Localización	tecnología	capacidad (m ³ /d)
Isla de Toas (Zulia)	ósmosis inversa	1.500
Archipiélago Los Roques	compresión de vapor	.
San Carlos (Zulia)	ósmosis inversa	1.400
Isla Zapara (Zulia)	ósmosis inversa	700
Isla de La Orchila	ósmosis inversa	100
Mitare 1 (Falcón)	ósmosis inversa	1.550
Mitare 2 (Falcón)	ósmosis inversa	580
Zazárida (Falcón)	ósmosis inversa	860
Las Guarabas (Falcón)	ósmosis inversa	890
Macanao (Nueva Esparta)	ósmosis inversa	.

48 En síntesis, los sistemas de desalinización han mostrado ser muy sensibles a deficiencias operacionales y captaciones. A pesar de que en Venezuela se viene acumulando experiencia en materia de desalinización de aguas marinas y salobres, a cierta escala, desde principios de la década de 1980 no se encontraron referencias sobre la identificación de impactos derivados de la utilización de estas tecnologías, lo cual no indica que no se hayan producido sino que no han sido objeto de atención e investigación, hecho lamentable porque es un tiempo y una experiencia perdida que podría ser aprovechada en el futuro para enfrentar el reto del país en esta materia.

5. 3. 1. EL AGUA DESALINIZADA: UN RECURSO PARA EL DESARROLLO DE LA REGIÓN NORTE COSTERA E INSULAR

49 En la actualidad, cuando se observan claros signos de deterioro en el servicio de suministro de agua potable a la población, a pesar de tener en el país un balance positivo de la disponibilidad de aguas superficiales frente a la demanda, sin duda se plantea la

necesidad de establecer una nueva visión que oriente la gestión integral del agua, en cuya concepción se integren, entre otros, los diferentes niveles de gobierno, las organizaciones de usuarios, las universidades y centros de investigación; y que, además, sus líneas maestras sean conocidas y asimiladas por los receptores del servicio de agua potable e industrial. La ocupación anárquica del territorio y la expansión sin límites de las ciudades hace cada vez más difícil cubrir los servicios básicos a las personas y se potencian los problemas sociales. La creación y ejecución de planes de desarrollo urbano –respetados por los diferentes niveles de gobierno– permitirían planificar con antelación el crecimiento y mejoramiento de la infraestructura de servicios públicos, lo que conllevaría la reducción de los conflictos y de las fallas en los sistemas de prestación de dichos servicios, en particular, el de suministro de agua potable y saneamiento. Todo ello a partir de una coordinación integrada de la gestión, con base en las competencias de cada nivel de gobierno, para lograr mayor satisfacción de la población.

50 El aprovechamiento de las aguas marinas para el desarrollo de la región norte costera e insular de Venezuela debe estar inscrito en los planes que orienten la gestión del agua en dichas regiones y en el país. No puede ser producto de decisiones espasmódicas y coyunturales, derivadas de intereses comerciales que penetren una comunidad o a dirigentes políticos hasta llegar a los centros de toma de decisión. Por ello es necesario contar con planes que orienten la gestión integral del agua y que estos sean de conocimiento público, amén de garantizar su ejecución.

51 La opción de usar las tecnologías de desalinización para cubrir la demanda de agua potable de las poblaciones asentadas en la región centro norte costera e insular, en principio, luce factible debido a que:

- Las tecnologías disponibles están probadas, y en el caso de las de membranas se avanza hacia procesos más eficientes desde el punto de vista energético.
- La posibilidad de instalar las plantas en sitios cercanos a la fuente de suministro de agua marina y a los centros de consumo, representan una ventaja evidente, entre otros aspectos, porque se disminuyen los costos de construcción, operación y mantenimiento de las obras de captación y de conducción. Se dispone de métodos de captación que reducen el impacto ambiental en los sitios de la toma de agua marina. Tal es el caso del uso de pozos radiales.
- La participación de los usuarios en el proceso de toma de decisiones y el respaldo de las diferentes instancias de gobierno para el desarrollo y operación de las plantas, puede ser una garantía para disponer de los recursos para el mantenimiento sostenido de las instalaciones.
- En el país y en el mundo existen experiencias en la operación de plantas desalinizadoras que debe ser aprovechada para no repetir los errores y potenciar los aciertos.
- Aunque la inversión de capital para desarrollar un proyecto de desalinización de agua de mar es alta, así como los costos de operación y mantenimiento, en la actualidad las mejoras tecnológicas incorporadas han hecho que el costo de cada m³ de agua de mar desalinizada sea cada vez menor y con una buena confiabilidad operativa.
- Los proyectos de desalinización responden bien a las economías de escala. Por ejemplo, en Hadera, Israel se ha construido una planta desalinizadora de ósmosis inversa con capacidad para producir 350.000 m³/día (4.000 lps), cuyo costo de producción es de US \$ 0,57/m³ (REUTERS, 2010).

- El costo asociado al deterioro de la calidad de vida por la falta absoluta del servicio de agua potable o al suministro racionado (cada 6 o 12 días), justifica la inversión en proyectos de desalinización. Porque en definitiva de lo que se trata es de la salud de la gente.
- 52 Para poder acometer el desarrollo y ejecución de proyectos de desalinización en la región norte costera e insular, se debe cumplir con los siguientes condicionantes:
- Disponer de un plan nacional de gestión integral del recurso agua.
 - Realizar un estudio de alternativas de las fuentes potenciales y de las tecnologías disponibles a fin de poder optar por la solución más viable, desde el punto de vista social, técnico, económico y ambiental.
 - En el caso de las plantas desalinizadoras, es necesario realizar estudios minuciosos para determinar los mejores sitios de captación de agua de alimentación y descarga de concentrado a fin de mitigar al máximo los impactos sobre los ecosistemas acuáticos. Una alternativa que debe ser considerada e investigada es la recuperación y uso posterior de las sales contenidas en las salmueras.
 - Apoyarse en las universidades y otros centros de investigación para la realización de estudios orientados al desarrollo de dispositivos y métodos para la captación de agua y minimizar los problemas de orden operacional y los impactos ambientales; el desarrollo de experticia para seleccionar las membranas más adecuadas para cada aplicación y garantizar una selección transparente; y la realización de programas de investigación para despejar las incertidumbres relacionadas con las implicaciones ambientales del uso de las tecnologías de desalinización.
 - Establecer los mecanismos institucionales, políticos y administrativos que garanticen el flujo de recursos económicos para garantizar la operación y mantenimiento de los sistemas instalados, para que se proteja la inversión de capital y se provea un servicio seguro, de buena calidad y oportuno. La clave de la confiabilidad operacional de los sistemas de desalinización, al igual que en los equipos e instalaciones de todos los sistemas de agua potable y de saneamiento, está en seguir los protocolos de operación y mantenimiento establecidos por el proveedor.
- 53 Sin duda alguna, en Venezuela es impostergable considerar el uso de las fuentes de aguas marinas y salobres para el suministro de agua potable a la población, de una manera responsable, bien soportada en estudios técnicos y considerando las variables sociales y ambientales. Hay que tener en cuenta, no obstante, que en un país donde la producción de agua potable per cápita es de 424 l/día (GONZÁLEZ, 2000), la primera línea de ataque al problema de la insuficiencia del servicio de suministro de agua, tiene que ser la racionalización de su uso y la optimización del funcionamiento de los sistemas de distribución.

REFERENCIAS

- ALARCÓN, D. (2005)
Comparación económica de procesos de desalinización de agua de mar: el reto de la destilación multi-efecto con energía solar. CIEMAT-PSA, Almería, España.
- BERMÚDEZ, C. (2009)
Alternativa tecnológica para el abastecimiento de agua a la subregión costa oriental del lago, eje Santa Rita-Lagunillas. Tesis de Magíster, Universidad Rafael Bellosó Chacín, Maracaibo, Zulia, Venezuela.
- DANOUN, R. (2007)
Desalination Plants: Potential impacts of brine Discharge on Marine Life. The University of Sydney, Sydney, Australia.
- FLOWSERVE CORPORATION. (2012)
Bulletin FPD-18e. *Brochure*. USA.
- GLOBAL WATER INTELLIGENCE. (2007)
Desalination Markets 2007. A Global Forecast. Global Information Inc., Oxford-England.
- GONZÁLEZ, A. (28 DE ENERO DE 2000)
Recuperado el 15 de julio de 2012, de http://www.cap-net-esp.org/water_management_tool/document/42/Venezuela.pdf.
- IBRAHIM, J. (1998)
Desalinización de aguas. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.
- IONICS. (2003)
Tratamiento terciario y desalación de aguas depuradas. Jornadas Técnicas: Membranas en el Tratamiento del Agua. EUP de Sevilla, Sevilla, España.
- MEDINA, J. (2000)
Desalinización de agua salobre y de mar. Ósmosis inversa. Mundiprensa, Madrid, España.
- MOREAU, A. (2007)
«Las medidas fundamentales», en *Geo-Venezuela*, tomo 1: La Tropicalidad Venezolana (cap. 8), Fundación Empresas Polar, Caracas, Venezuela.
- NACIONES UNIDAS. (2003)
World Water Assessment Program. 1st United Nations World Water Development Report: Water for People, Water for Life (WWDR1). http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr1/index_es.shtml
- PACIFIC INSTITUTE, W. W. (2007)
Recuperado el 15 de julio de 2012, de <http://www.worlwater.org>.
- REUTERS (16 DE MAYO DE 2010)
www.reuters.com. Recuperado el 23 de julio de 2012, de www.reuters.com/article/2010/05/16/us-israel-desalination-idUSTRE64F10-820100519.
- SINCERO, G.A. (2003)
Physical-Chemical Treatment of Water and Wastewater. CRC Press. CRC Press, London, England.
- THE NATIONAL ACADEMIES OF USA. (2008)
Desalination: A National Perspective. The National Academies of USA, National Research Council. The National Academic Press, Washington, D.C., USA.