Nota

Optimización multicriterio para desalar agua de mar Multi-criteria optimization for seawater desalination

Octavio Chamblás¹ Lorena Pradenas²

¹Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, ochamblas@udec.cl

²Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, lpradena@udec.cl

Autor para correspondencia: Lorena Pradenas, Ipradena@udec.cl

Resumen

Este estudio trata la toma de decisiones para la desalación de agua de mar y su posible uso en la industria. Considera la evaluación de seis tecnologías de desalación, como destilación instantánea de múltiple etapa, destilación múltiple efecto, destilación por compresión de vapor, ósmosis inversa, electrodiálisis y nanofiltración. Toma en cuenta criterios ambientales, técnicos y económicos, y desglosados en ocho subcriterios. Se usan los métodos de optimización multicriterio (MCDM): AHP, ELECTRE y TOPSIS. Se determinó que la mejor alternativa para desalar agua de mar es la ósmosis inversa, seguida por la nanofiltración, luego los métodos térmicos de desalación y, en último lugar, la electrodiálisis. Los resultados mostraron el mismo ranking sin mayores discrepancias. Se concluye que la desalación mediante membranas es una buena opción para abastecer de agua para diversos usos públicos, por ejemplo a pequeños agricultores, en zonas donde existe escasez de este recurso.

Palabas clave: toma de decisiones multicriterio, MCDM, AHP, ELECTRE, TOPSIS, desalación de agua de mar.

Abstract

In this study, the decision-making process for seawater desalination and its possible use in industry are addressed. Six desalination technologies were considered: multistage instantaneous distillation, multiple effect distillation, vapor compression distillation, reverse osmosis, electrodialysis, and nanofiltration. The problem was analyzed from several perspectives, including the evaluation of environmental,

technical, and economic criteria, which were broken down into eight sub-criteria. The alternatives were evaluated considering three different multi-criteria decision-making (MCDM) methodologies: AHP, ELECTRE, and TOPSIS. The results show that the best option for desalinating seawater is reverse osmosis, followed by nanofiltration, thermal desalination methods, and lastly, electrodialysis. The results for the different methods showed the same ranking and no major discrepancies. It is concluded that desalination using membranes is a good option that could be used to supply water for various purposes, such as in industry.

Keywords: Multiple-criteria decision making, MCDM, AHP, ELECTRE, TOPSIS, seawater desalination.

Recibido: 16/04/2017 Aceptado: 20/12/2017

Introducción

Los recientes problemas asociados con el cambio climático afectan la regeneración natural del agua, un recurso cada vez más escaso. Cerca de 20% de la población mundial reside en zonas sin agua suficiente y otro 10% se acerca a esto. De toda el agua dulce en el mundo, 69% se encuentra en los polos y en las cumbres de las montañas más altas y en estado sólido. El 30% es humedad del suelo o está en acuíferos profundos. Sólo el 1% del agua dulce del mundo escurre por las cuencas hidrográficas en forma de arroyos o ríos, y se deposita en lagos, lagunas y en otros cuerpos superficiales de agua, al igual que en acuíferos (Fritzmann, Löwenberg, Wintgens, & Melin, 2007). Por lo anterior, se requiere la búsqueda de opciones para el abastecimiento sustentable del agua. La desalación del agua de mar es una importante alternativa a esta problemática.

Existen métodos para desalar el agua, con ventajas y desventajas que dependen de diversos factores asociados con cada proceso. Estudios se han centrado en generar bases de datos con costos (operativos y capital), para distintas desalaciones (Ettouney, El-Dessouky, Faibish, & Gowin, 2002). Además, los costos de desalar agua de mar y aguas salobres son diferentes por las concentraciones de sales conocidas como sólidos totales disueltos (TDS), esto es, minerales, sales, metales, cationes o aniones disueltos en agua. Mientras más salada (mayor TDS), mayor costo operativo de desalación. Además, mientras

mayor es la capacidad de la planta de desalación más barato es el proceso (Karagiannis & Soldatos, 2008; Zotalis, Dialynas, Nikolaos, & Angelakis, 2014). Otros estudios han correlacionado datos y generan modelos matemáticos sobre costos y capital para los métodos de desalación (Wittholz, O'Neill, Colby, & Lewis, 2008).

Sobre los factores ambientales para la desalación existe complejidad en el pre y postratamiento de los procesos de membranas (Fritzmann et al., 2007). Los procesos térmicos, en cambio, no requieren un tratamiento delicado (Gude, 2015). Por último, se deben considerar los costos asociados con el transporte del agua desde y hacia la planta de desalación (Zhou, 2005).

En el uso de técnicas de MCDM, autores comparan la efectividad de los métodos AHP y PROMETHEE en la mejor opción de suministro energético (Georgiou, Mohammed, & Rozakis, 2015), con alternativas de suministro, y con criterios ambientales, económicos, sociales y técnicos.

Uno de los primeros estudios con MCDM trata la desalación de agua salobre en Jordania (Mohsen & Al-Jayyousi, 1999), con alternativas tecnológicas en cuanto a lo siguiente: destilación múltiple efecto (MED); destilación instantánea múltiple etapa (MSF); destilación por compresión de vapor (CV); osmosis inversa (RO) y electrodiálisis (ED), y con el método AHP; selección de la mejor planta de desalación de agua de mar con AHP (Hajeeh & AI-Othman, 2005), considerando tecnologías (MED, MSF, CV y RO) y alternativas de construcción de plantas; uso de AHP difuso, con tres alternativas (MED, MSR y RO) de desalación para suministrar agua fresca al estado de Kuwait (Hajeeh, 2006); un estudio con integración de dos etapas y uso de AHP difuso y TOPSIS para desalar aguas salobres (Ghassemi & Danesh, 2013), y obtener agua potable con electrodiálisis. Existen también estudios con herramientas de MCDM para ciudades sustentables (Si, Marjanovic-Halburd, Nasiri, & Bell, 2016) o con energía solar para la desalación (Shatat, Worall, & Riffat, 2013).

A pesar de los diversos trabajos con herramientas MCDM, a nuestro entender no se dispone de estudios sobre desalación de agua de mar para su posible uso en consumo público y en la agroindustria en países en vías de desarrollo. Entonces, este trabajo, considera la desalación de agua de mar con herramientas multicriterio y alternativas tecnológicas tipo MSF, MED, CV, ED, RO y NF.

Metodología

En esta sección se mencionan características básicas de los métodos de desalación y también de los métodos MCDM usados en el presente estudio.

Métodos de desalación

- Destilación flash múltiple etapa (MSF). Al reducir abruptamente la presión del agua de mar por debajo de su presión de vapor de equilibrio ocurre una súbita evaporación. La recuperación máxima es entre 12 y 20%.
- Destilación múltiple-efecto (MED). Usa el mismo principio del proceso MSF y difiere en la forma de realizar la evaporación. El agua de mar se rocía sobre la superficie de tubos del evaporador, formando una película delgada que favorece rápida ebullición y evaporación. La recuperación máxima es entre 30 y 40%.
- Destilación con compresión de vapor (CV). El calor necesario para ebullición del agua de mar se obtiene del vapor removido del evaporador y reinyectado en la primera etapa, posterior a ser comprimido para elevar su temperatura de saturación. La recuperación máxima es entre 40 y 50%.
- Ósmosis inversa (RO). Método para extraer sólidos disueltos del agua, como sales, usando membrana semipermeable. Con permeabilidad alta para el agua, pero muy baja para las sales. No involucra cambio de fase. El agua pasa a través de la membrana impulsada, por una bomba que eleva su presión hasta un valor superior de su presión osmótica natural. Usa bomba de alta presión, del orden de 5.4 a 8.2 MPa. La fracción de agua desalada es entre 30 y 45%.
- Nanofiltración (NF). Filtración de membrana que funciona similar a la ósmosis inversa. La diferencia es que la membrana no es tan cerrada y con presión de alimentación inferior. Además, no elimina iones monovalentes del agua. Las presiones transmembrana varían entre 1.5 y 5 MPa.
- Electrodiálisis (ED). Separación electroquímica, usa membranas cargadas y una diferencia de potencial eléctrico para separar especies iónicas y otros. Muy usada para la desalación del agua salobre.

Métodos MCDM

A continuación se presentan principales características de los MCDM usados.

• Analytic Hierarchy Process (AHP). Propuesto por Thomas L. Saaty (Saaty, 1980) es un clásico en la toma de decisiones. Se aplica en casi todos los ámbitos y se resume en las siguientes etapas:

Modela el problema con jerarquías, conteniendo objetivo de la decisión, alternativas para lograrlo, criterios y subcriterios para evaluación de las opciones; luego establece prioridades entre los elementos de la jerarquía, con juicios basados en la comparación de pares de elementos; definimiento, pesos en las variables de decisión; sintetiza los juicios y genera un conjunto ideal de prioridades de la jerarquía, para evaluar las distintas alternativas en la solución del problema de decisión; finalmente revisa la consistencia de juicios entre los criterios de las evaluaciones y alternativas disponibles para obtener decisión final en relación con los resultados del proceso.

• Elimination et Choix Traduisant la Realité (ELECTRE). La forma de seleccionar una alternativa entre varias es comparar con base en ciertos criterios de evaluación (Benayoun, Roy, & Sussman, 1966). En cada criterio se establece una ponderación o peso relativo w. Se evalúan las ventajas y desventajas relativas entre las alternativas en cada criterio, y se jerarquiza en orden de preferencia de la mejor a la peor.

Usa relación de superación o sobre-calificación $A_hS_jA_k$ que indica que la alternativa (o escenario) A_h es preferible a A_k en el criterio (o atributo), considerando que la calificación de A_h es mayor o igual que la de A_k . O sea, se considera que A_h es tan buena o mejor que A_k . El método establece dos condiciones para probar que A_h es preferible o sobrecalifica a A_k . Usa relación de superación, y dos cuadros o matrices (de concordancia y de discordancia), de manera normalizada a los valores de las calificaciones, y con las m alternativas y n criterios de selección. Requiere una matriz de decisión normalizada con las calificaciones; los elementos de esta matriz son a_{ij} , es decir, las evaluaciones para cada una de las alternativas A_i en los criterios j.

• Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). Usa el concepto de alternativa ideal, con la noción absoluta de ideal Zeleny (Zeleny & Starr, 1977), opción más próxima del ideal. Considera las sutilezas del ideal y se construye un método operativo. Desarrollado por Hwang y Yoon, en el año 1981, se basa en que una alternativa determinada se ubique a la menor distancia respecto de una alternativa ideal que representa lo mejor (ideal positiva o simplemente ideal), y a la mayor distancia respecto a una alternativa ideal que representa lo peor (ideal negativa o antiideal).

Resultados

En la Tabla 1a se encuentran los siguientes parámetros: criterios (C_j) ; subcriterios (SC_j) para ambiental, económico y técnicos. En la Tabla 1b, se tienen las alternativas tecnológicas; la desalación se analiza mediante AHP, ELECTRE y TOPSIS, y se muestran los resultados con cada método.

Uso de AHP

Se genera la matriz de comparación entre los subcriterios respecto de ellos mismos. Se normaliza y obtienen los pesos ponderados de cada criterio, con el promedio de los elementos de la fila del subcriterio correspondiente (Tabla 1c). Para cada subcriterio se genera una matriz con las alternativas y sus respectivas calificaciones a pares. Se obtiene matriz de vectores de prioridad con tecnologías y subcriterios, y el vector de prioridad de los subcriterios (Tabla 1d).

Tabla 1. Uso de AHP.

Tabla 1a. Criterios y subcriterios de AHP.

Criterio	Subcriterio	Definición		
Ambiental (C1)	Manejo de residuos (SC1)	Manipulación y eliminación de salmuera		
Técnicos (C2)	Complejidad operacional (SC2)	Habilidades en operar la tecnología		
	Pretratamiento y adaptabilidad (SC3)	Tecnología/agua alimentada		
	Confiabilidad o estabilidad (SC4)	Tecnología en condiciones estacionarias		
	Recuperación de agua (SC5)	Agua generada/agua alimentada		
	Calidad de agua tratada (SC6)	Calidad de agua generada (ppm de sales)		
Franómicos (C3)	Costo capital fijo (SC7)	Inversión en equipos, instalaciones y construcción		
Económicos (C3)	Costos operativos (SC8)	Gastos en salarios, suministros (energía), productos, servicios y mantención		

Tabla 1b. Alternativas tecnológicas.

Alternativas	Tecnología
A1	MSF

A2	MED
A3	CV
A4	RO
A5	ED
A6	NF

Tabla 1c. Matriz de comparación de subcriterios normalizada y vector de prioridad de subcriterios.

	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	SC8	w
SC1	0.06	0.12	0.09	0.17	0.02	0.02	0.06	0.08	0.08
SC2	0.02	0.04	0.02	0.08	0.02	0.02	0.05	0.07	0.04
SC3	0.03	0.08	0.05	0.13	0.02	0.02	0.05	0.06	0.05
SC4	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.06	0.08	0.03
SC5	0.12	0.12	0.09	0.08	0.05	0.02	0.04	0.05	0.07
SC6	0.19	0.16	0.18	0.13	0.19	0.07	0.05	0.06	0.12
SC7	0.25	0.20	0.23	0.17	0.29	0.35	0.23	0.20	0.23
SC8	0.31	0.24	0.32	0.21	0.38	0.49	0.47	0.40	0.35

Tabla 1d. Matriz de vectores de prioridad entre tecnologías y subcriterios y vector de prioridad de subcriterios.

Tecnología	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	SC8
MSF	0.293	0.028	0.298	0.081	0.027	0.294	0.071	0.057
MED	0.171	0.051	0.231	0.038	0.101	0.165	0.067	0.145
CV	0.314	0.100	0.231	0.038	0.163	0.294	0.037	0.068
RO	0.095	0.348	0.059	0.324	0.420	0.117	0.466	0.303
ED	0.046	0.175	0.059	0.192	0.058	0.029	0.098	0.068
NF	0.078	0.295	0.120	0.324	0.227	0.098	0.259	0.355
Vector prioridad w	0.078	0.039	0.053	0.034	0.072	0.128	0.239	0.353

Al final se multiplica cada valor de la tecnología (determinado subcriterio) con el correspondiente elemento del vector de prioridad, asociado con el subcriterio y con cada subcriterio, y se suman los valores, obteniendo el puntaje de uso de cada tecnología. Se genera ranking con tecnologías más convenientes (Tabla 1e).

Tabla 1e. Vector de prioridad de cada tecnología y su ranking.

Tecnología	puntaje	ranking	
MSF	0.1202	5	

MED	0.1253	3
CV	0.1251	4
RO	0.3004	1
ED	0.0763	6
NF	0.2526	2

Uso de ELECTRE

Se dispone de la matriz de concordancia (Tabla 2a), con la proporción de los pesos cuando la tecnología A_h es tan buena o mejor que la tecnología A_k , según la Tabla 1d. En las celdas se suman los pesos correspondientes a los subcriterios. Después se genera la matriz de discordancias (Tabla 2b); se explicita en las celdas la mayor diferencia entre aquellos subcriterios cuando la tecnología A_h es peor que la tecnología A_k (si la tecnología A_h es siempre mayor o igual, se identifica con "cero").

Finalmente, el umbral de preferencia p=0.5351 y el umbral de indiferencia q=0.5401. La Tabla 2c es la comparación de tecnologías por filas y luego por columnas, por pares, de matrices de concordancia y discordancia. La tecnología A_h domina a A_k si C (h, k) es mayor o igual al umbral de preferencia o de sobrecalificación, y sólo si D(h, k) es menor o igual al umbral de indiferencia o no sobrecalificación. Por ejemplo, la tecnología MSF domina a la MED y es superada por la tecnología CV, con diferencia igual a cero y está en tercer lugar ($3^{\rm er}$), compartido con MED y CV en el ranking.

Tabla 2. Uso de ELECTRE.

Tabla 2a. Matriz de concordancia para las tecnologías de desalación.

	MSF	MED	CV	RO	ED	NF
MSF	0	0.5351	0.3285	0.2603	0.2603	0.2603
MED	0.4648	0	0.5932	0.2603	0.6857	0.2603
CV	0.5434	0.3181	0	0.2603	0.3324	0.2603
RO	0.7396	0.7396	0.7396	0	0.9463	0.5580
ED	0.7396	0.3142	0.6675	0	0	0
NF	0.7396	0.7396	0.7396	0.4070	1	0

Tabla 2b. Matriz de discordancia para las tecnologías de desalación.

	MSF	MED	CV	RO	ED	NF
MSF	0	0.2947	0.3462	1	0.4603	1
MED	0.4872	0	0.5320	1	0.5401	1
CV	0.2796	0.2593	0	1	0.5401	1
RO	1	0.7203	0.8147	0	0	0.2542
ED	1	0.7203	1	0.9203	0	0.9630
NF	0.8037	0.4661	0.8813	0.4903	0	0

Tabla 2c. Resultados método ELECTRE.

Tecnología	Dominancia por Filas	Dominancia por Columna	Diferencia de dominancias	Ranking
MSF	MED	CV	0	3 ^{ro}
MED	CV-ED	MSF-NF	0	3 ^{ro}
CV	MSF	MED	0	3 ^{ro}
RO	ED-NF	-	2	1 ^{ro}
ED	-	MED-RO-NF	-3	4 ^{to}
NF	MED-ED	RO	1	2 ^{do}

Uso de TOPSIS

Los pesos relativos de subcriterios y matriz de decisión son igual a AHP (Tabla 3ª, la matriz normalizada ponderada).

Tabla 3. Uso de TOPSIS.

Tabla 3a. Matriz de decisión normalizada ponderada.

	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	SC8
MSF	0.0231	0.0011	0.0159	0.0028	0.0019	0.0377	0.0170	0.0204
MED	0.0135	0.0020	0.0124	0.0013	0.0073	0.0211	0.0160	0.0514
CV	0.0247	0.0039	0.0124	0.0013	0.0117	0.0377	0.0090	0.0241
RO	0.0075	0.0137	0.0032	0.0113	0.0303	0.0150	0.1119	0.1074
ED	0.0036	0.0069	0.0032	0.0067	0.0042	0.0037	0.0235	0.0243
NF	0.0061	0.0116	0.0064	0.0113	0.0164	0.0126	0.0623	0.1257

Luego se calcula la solución ideal positiva y la solución ideal negativa, que corresponden al máximo y mínimo valor, respectivamente, asociado con cada columna. Por ejemplo, la solución ideal positiva en el subcriterio 1 es 0.0247, el máximo valor en esa columna. Por otro lado, la solución ideal negativa asociada con dicha columna es 0.0036. Los resultados se encuentran en la Tabla 3b. Se calculan las medidas de distancia, que representan la distancia geométrica a los valores de las soluciones ideales positivas y negativas (ver Tabla 3c). Por último, se obtiene la proximidad relativa a la solución ideal con el puntaje asociado con cada opción para jerarquizar las tecnologías evaluadas y determinar cuál implementar. Mientras el valor de la tecnología sea más cercano a uno, mejor evaluada se encontrará dicha opción en este método. Los resultados se muestran en la Tabla 3d.

Tabla 3b. Soluciones ideales positivas y negativas.

	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	SC8
A+	0.0247	0.0137	0.0159	0.0113	0.0303	0.0376	0.1119	0.1257
A-	0.0036	0.0011	0.0031	0.0013	0.0019	0.0037	0.0090	0.0204

Tabla 3c. Matriz de distancias positivas y negativas.

	d+	d-
MSF	0.1453	0.0412
MED	0.1260	0.0391
CV	0.1464	0.0424
RO	0.0362	0.1391
ED	0.1435	0.0171
NF	0.0610	0.1201

Tabla 3d. Proximidades relativas y *ranking*.

Tecnología	R	Ranking
MSF	0.2240	5
MED	0.2367	3
CV	0.2246	4
RO	0.7935	1
ED	0.1067	6
NF	0.6632	2

Por otro lado, se observa en la Tabla 1d que los subcriterios de mayor importancia son SC8: costos operativos, con un 35% de importancia;

el SC7: costo capital fijo, con peso ponderado aproximado al 24%, y el SC6: calidad del agua, con peso aproximado de 12.8%. Dado que los SC7 y SC8 conforman el criterio económico, se observa que en conjunto constituyen más de la mitad de la importancia total; la suma de sus pesos es cercano al 60%. O sea, el criterio económico es el más importante en la toma de decisiones. La Tabla 4 dispone de los pesos mediante la evaluación por pares en el método AHP y también usado en la toma de decisiones con los métodos ELECTRE y TOPSIS.

Tabla 4. Pesos de los criterios y subcriterios.

Criterio	Peso (%)	Subcriterio	Peso (%)
Ambiental (C1)	7.87	Manejo de residuos (SC1)	7.87
Técnico (C2)	32.81	Complejidad operacional (SC2)	3.94
		Pretratamiento y adaptabilidad (SC3)	5.37
		Confiabilidad o estabilidad (SC4)	3.49
		Recuperación de agua (SC5)	7.21
		Calidad de agua tratada (SC6)	12.80
Económicos (C3)	59.33	Costo capital fijo (SC7)	23.99
		Costos operativos (SC8)	35.33

A pesar que el criterio técnico tiene más subcriterios, no significa que estos criterios tienen la mayor importancia comparados con los otros. Por otro lado, en criterio técnico se analizan varios subcriterios, pero ninguno es de orden crítico, como para influir en la decisión final. Así, subcriterios como el costo de capital fijo (costo de inversión de la planta) es importante; sin embargo, el más significativo es el costo operativo asociado con el proceso, porque es muy variable dependiendo del proceso seleccionado y muy influyente en su factibilidad.

Tabla 5. Puntuación y *ranking* de las distintas tecnologías de desalación.

Tecnología	Puntaje			Ranking		
	AHP	ELECTRE	TOPSIS	AHP	ELECTRE	TOPSIS
MSF	0.1202	0	0.2240	5	3	5
MED	0.1253	0	0.2367	3	3	3
CV	0.1251	0	0.2246	4	3	4
RO	0.3004	2	0.7934	1	1	1
ED	0.0763	-3	0.1066	6	4	6

NF 0.2526	1	0.6631	2	2	2
-----------	---	--------	---	---	---

Discusión

Sobre las tecnologías, la menor calificación y ubicada en el último lugar es la electrodiálisis (ED); es una de las mejores alternativas para desalar aguas salobres, pero el rendimiento para desalar aguas de mar es menor debido a la alta concentración de sales. Tiene bajo consumo energético para tratar aguas con contenidos salinos inferiores a los 3 500 ppm de TDS; sin embargo, el agua de mar puede disponer hasta 30 000 ppm.

A continuación siguen las tecnologías térmicas: destilación instantánea múltiple etapa (MSF) en quinto lugar; la destilación por compresión de vapor (CV) en cuarto lugar y, por último, la destilación múltiple efecto (MED) en tercer lugar. Tienen algunas ventajas sobre los métodos de membranas, pero no son más relevantes en la evaluación. Se caracterizan por devolver el agua, aunque levemente más caliente, con concentraciones de sales menores comparadas a la OR o la NF. Además, estos últimos eliminan compuestos químicos al ambiente (anti-incrustantes), que generan efectos perjudiciales a largo plazo en la zona de descarga (Gude, 2015). Las últimas ventajas en el subcriterio 3 se refieren a la calidad o pureza del agua fresca a obtener en esos procesos. Las tecnologías térmicas tienen la ventaja de desalar el agua y dejarlas con concentraciones mínimas de sales (TDS, inferiores a los 50 ppm). Son tecnologías apropiadas para obtener aqua con los mínimos contenidos salinos, sin embargo algunas normativas permiten hasta 1 500 ppm de TDS. Poseen consumos energéticos más elevados que otras opciones y encarecen el proceso, sobre todo en países en vías de desarrollo, donde los combustibles no son baratos ni accesibles, como por ejemplo en Oriente Medio.

Finalmente, RO se encuentra en primer lugar y NF en segundo lugar. La ósmosis inversa (RO) posee un mejor rendimiento para impedir el paso selectivo de iones y sales a través de la membrana, generando aguas con menores concentraciones de TDS, lo cual es positivo, aunque para lograrlo se requiere un gradiente de presión mayor, o sea, un consumo energético mayor. Estudios recientes consideran que es posible desalar agua mediante NF con una calidad similar a la obtenida mediante RO, pero con un menor consumo energético (Adham, Cheng, Vuong, & Wattier, 2003). A pesar de esto y superar la ósmosis inversa en el subcriterio 8, tiene la mayor ponderación que en la mayoría de los demás subcriterios, pues es un proceso de dos etapas, a diferencia de la ósmosis inversa, que ocurre en una. La NF es una operación más compleja de operar y controlar, al compararla con la RO. También la

capacidad de recuperación de agua y la calidad en la concentración de sales del agua final es sobrepasada. Por lo tanto, la RO es la opción más viable para desalar agua de mar en un posible consumo agroindustrial y hasta doméstico.

Por último se aprecia que la jerarquización o *ranking* es la misma para AHP y TOPSIS. En ELECTRE se observa leve diferencia. En tercer lugar se encuentran empatados los tres procesos térmicos (MED, MSF y CV). ELECTRE presenta un algoritmo más impreciso que TOPSIS y AHP, que tienen una puntuación mediante un *ranking*. El método ELECTRE entrega sólo una jerarquización. Los "puntajes" consisten en las diferencias de dominancias entre filas y columnas. Se observa que tanto TOPSIS como AHP, con las tecnologías MSF, MED y CV, presentan puntajes muy similares. Se puede decir que el método ELECTRE es el que posee una menor precisión en sus resultados y es más complejo de operar.

Sobre AHP y TOPSIS, ambos métodos usa la misma matriz de decisión y el mismo *ranking*. Reflejan muy buenos resultados y con alta coherencia entre ellos.

Conclusiones

El uso de MCDM entregó resultados consistentes con la realidad actualmente. Se usan y desarrollan procesos de desalación por membrana y principalmente por ósmosis inversa. Las ventajas de la nanofiltración son recientes y se esperan mejorar a través del tiempo.

Todos los métodos MCDM usados proporcionaron *ranking* en el mismo sentido. La mejor opción en las jerarquizaciones de los métodos (AHP, ELECTRE y TOPSIS) es RO, NF, MED, CV, MSF y ED.

Los resultados son altamente condicionados por criterios económicos, porque el consumo energético es relevante y que tiene directa relación con los costos operativos del proceso.

Los resultados son concordantes con la realidad, por ejemplo, para países latinoamericanos, donde las alternativas tecnológicas de membranas muestran una clara superioridad sobre los métodos térmicos de desalación de agua de mar debido a costos asociados con cada uno de los procesos.

A futuro se esperaría estudio similar con uso de alternativas con energías renovables y aplicadas en sectores agrícolas precisos y que disponen en la cercanía de fuentes con agua de mar.

Agradecimientos

Este estudio ha sido parcialmente apoyado por el proyecto CONICYT-BASAL-FB0816.

Referencias

- Adham, S., Cheng, R. C., Vuong, D. X., & Wattier, K. L. (2003). Long beach's dual-stage NF beats single stage RO. *Desalination & Water Reuse*, 13(3), 18-21.
- Benayoun, R., Roy, B., & Sussman, N. (1966). *Manual de referance du Programme ELECTRE* (Note de Syntheses et Formation 25). Paris, France: Direction Scientifique SEMA.
- Ettouney, H. M., El-Dessouky, H. T., Faibish, R. S., & Gowin, P. J. (2002). Evaluating the Economics of Desalination. *Chemical Engineering Progress*, 98(12), 32-39.
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., & Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*, 216(1-3), 1-76.
- Georgiou, D., Mohammed, E. S., & Rozakis, S. (2015). Multi-criteria decision making on the energy supply configuration of autonomous desalination units. *Renewable Energy*, 75(C), 459-467.
- Ghassemi, S. A., & Danesh, S. (2013). A hybrid fuzzy multi-criteria decision making approach for desalination process selection. *Desalination*, 313(2013), 44-50.
- Gude, V. G. (Feb. 1, 2015). Desalination and Sustainability An Appraisal and Current 1 Perspective. *Water Research*, 1-70.
- Hajeeh, M. A. (2006). Fuzzy Approach for Water Desalination Plants Selection. Water and Geoscience, 53-62. Recovered from https://pdfs.semanticscholar.org/c139/ff1b326d7c3b6d62a8a57 25ad4c422d95ae3.pdf
- Hajeeh, M. & AI-Othman, A. (2005). Application of the analytical hierarchy process in the selection of desalination plants. *Desalination*, 174(2005), 97-108.
- Karagiannis, I. C., & Soldatos, P. G. (March, 2008). Water desalination cost literature: review and assessment. *Desalination*, 223(1-3), 448-456.
- Mohsen, M. S., & Al-Jayyousi, O. R. (November, 1999). Brackish water desalination: an alternative for water supply enhancement in Jordan. *Desalination*, 124(1-3), 1999, 163-174.
- Saaty, T. L. (1980). *Multicriteria decision Making: The Analytic Hierechy Process.* New York, USA: McGraw Hill.

- Shatat, M., Worall, M., & Riffat, S. (December, 2013). Opportunities for solar water desalination worldwide: Review. *Suistainable Cities and Society*, 9, 67-80.
- Si, J., Marjanovic-Halburd, L., Nasiri, F., & Bell, S. (November, 2016). Assessment of building-integrated green technologies: A review and case study on applications of Multi-Criteria Decision Making (MCDM) method. Sustainable Cities and Society, 27, 2016, 106-115.
- Wittholz, M. K., O'Neill, B. K., Colby, C. B., & Lewis, D. (September 15, 2008). Estimating the cost of desalination plants using a cost database. *Desalation*, 229(1-3), 10-20.
- Zeleny, M., & Starr, M. (1977). *Multiple Criteria Decision Making*. New York, USA: North-Holland.
- Zhou, Y. (2005). Evaluating the costs of desalination and water transport. *Water Resources Research*. Recovered from https://doi.org/10.1029/2004WR003749
- Zotalis, K., Dialynas, E. G., Nikolaos, M., & Angelakis, A. N. (2014). Desalination technologies: Hellenic experience. *Water*, 6, 1134-1150. DOI:10.3390/w6051134