



Identificación del Trabajo	
Área:	Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
Categoría:	Graduado
Regional:	Rosario

Diseño de prefactibilidad con criterios de optimalidad de un desalador asistido exclusivamente por energía solar. Caso: Arabia Saudita

Jesús A. BIAIN

Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería - CAIMI, Facultad Regional Rosario, UTN

E-mail de contacto: jbiain@frro.utn.edu.ar

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Dr. Nicolás J. Scenna y la Dra. Sonia J. Benz, en el marco del proyecto "Estrategias para el Diseño Óptimo de Procesos Sustentables Considerando la Valorización de Subproductos y la Incorporación de Energías Renovables". (2018 –2020)

Resumen

El cambio climático nos obliga a pensar nuevas y sustentables formas de producir agua potable para aquellas regiones con escasez de esta. Se propone integrar la tecnología de colectores solares cilindro-parabólicos a un desalador del tipo flash de múltiples etapas que incluya un acumulador de inercia, de manera tal de permitir el funcionamiento del sistema las 24 horas del día sin recurrir a un calentador auxiliar que se alimente de fuentes de energía no renovables. Como caso típico se analiza la ciudad de Dhahran, Arabia Saudita, tanto por la abundante radiación solar que recibe como por su escasez de fuentes de agua dulce. Los resultados obtenidos son muy favorables y alentadores ya que, por ejemplo, el costo estimado del m³ de agua potable producido se encuentra dentro del rango de precios actual para esa región.

Palabras Claves: Colector solar cilindro-parabólico; Optimización; Desalación

1. Introducción

El rápido crecimiento industrial y poblacional alrededor del mundo ha aumentado la demanda de agua potable. El problema es aún mayor si se considera la contaminación de ríos y lagos por parte de las industrias y los desechos residuales. La única fuente inagotable de agua son los océanos. Su principal inconveniente, sin embargo, es su alta salinidad. Por otro lado, existen lugares geográficos remotos fuera de la red de distribución, para los cuales la desalinización asistida solarmente puede ser más económica que otras alternativas como el agua transportada en camiones o en la desalinización provista de electricidad generada por motores diésel.

Como puede verse en la Tabla I (tomada de GWI DesalData & IDA, 2017) Arabia Saudita es el principal desalador de agua marina del mundo, esto se debe tanto a la escasez de fuentes de agua dulce como a sus abundantes recursos energéticos fósiles. En esta región, a su vez, la disponibilidad de radiación solar es abundante. La desalinización asistida a través de energía solar es atractiva como medio para conservar los recursos fósiles y para limitar la huella de carbono de la desalación.

Tabla I. Principales países desalinizadores (período 2007-2016)

País	Billones de US\$ (2007-2011)	Billones de US\$ (2012-2016)
Arabia Saudita	5,39	13,47
EEUU	2,45	11,4
EAU	4,61	10,47
Australia	3,36	8,29
China	1,48	5,29
Kuwait	1,55	5,18

Respecto a las tecnologías para la captación de energía solar, se destacan los colectores cilindro-parabólicos (PTC, por sus siglas en inglés), cuya principal ventaja radica en su mayor eficiencia a altas temperaturas lo que redundará en una menor superficie para igual demanda de energía a satisfacer. Además, esta tecnología permite el uso de almacenamiento térmico (TES, por sus siglas en inglés) que proporciona capacidad de despacho, una ventaja única, que no existe con ninguna otra tecnología de energía renovable hasta la fecha.

Desde el punto de vista del acoplamiento entre un PTC y un proceso, la desalación cuenta con la ventaja de su relativamente baja temperatura de operación. Tan es así que el fluido de transferencia energética (HTF, por sus siglas en inglés) puede incluso ser agua a presión, lo cual evita el costo debido a aceites sintéticos.

El enfoque que aquí se propone como solución es diseñar un desalador del tipo flash de múltiples etapas (MSF, por sus siglas en inglés) asistido exclusivamente por energía solar captada a través de un PTC. Con el objetivo de poseer total autonomía, la energía captada será almacenada las 24 horas del día en un acumulador de inercia. Por otro lado, el acoplamiento de ambos procesos, es decir, entre el PTC y el MSF, será a través de un intercambiador de calor (HX, en inglés). El HTF a utilizar será agua a una presión absoluta de 10 bar.

El desarrollo del presente trabajo incluye etapas que van desde evaluar la disponibilidad de recurso solar en la región elegida a lo largo del año, a realizar un análisis paramétrico, y finalmente optimizar, mediante el software GAMS, el costo de inversión del sistema completo en función de la producción de agua potable. Como caso típico se analizará la ciudad de Dhahran, Arabia Saudita.

2. Modelo Matemático

El sistema se modela a partir de bloques de tareas que incluyen las ecuaciones operativas y de diseño que predicen el comportamiento de los distintos elementos. Entonces, un primer bloque permite evaluar la disponibilidad del recurso solar (determinación de la radiación solar recibida por el equipo así como el ángulo de incidencia con que lo hace, en una localidad dada y a lo largo de todo el horizonte de tiempo); el segundo bloque incluye la descripción del diseño óptico-geométrico-termodinámico del colector solar cilindro-parabólico; el tercer bloque referido al tanque de acumulación de energía térmica, que incluye el modelo del equipo en estado transitorio, donde la dinámica de funcionamiento depende de la cantidad de energía a almacenar, la temperatura de almacenamiento y las propiedades termodinámicas del fluido; el cuarto bloque, que representa el intercambiador de calor que acopla el sistema de captación solar y conservación

de energía térmica con el desalador; por último, el quinto bloque está dedicado al diseño y operación del desalador (ver Figura 1). Para el bloque 1 se utilizó el modelo descrito por Kalogirou (2014), complementado por las correlaciones de Abouhashish (2017) referidas a la región de Arabia Saudita. Para los bloques 2 y 3 también se utilizó el modelo descrito por Kalogirou (2014). Para los bloques 4 y 5 se usó el modelo descrito por Rodriguez (2015). A continuación, se mencionarán las ecuaciones principales de cada bloque (Ecuaciones 1-10).

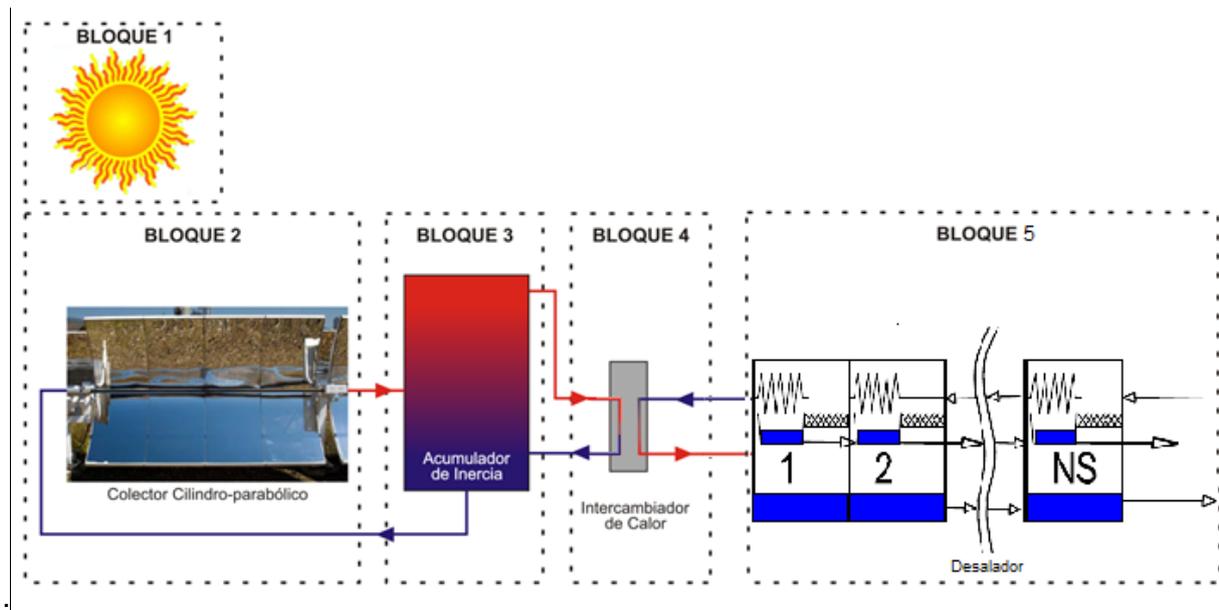


Figura 1. Acoplamiento entre los equipos del sistema.

2.1. Bloque 1

$$G_B = G_{Bn} \cos \Phi \quad (1)$$

$$\sin \alpha = \cos \Phi = \sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos h \quad (2)$$

$$G_{Bn} = A e^{\left[\left(\frac{-P}{P_0} \right) \cdot \left(\frac{B}{\sin \alpha} \right) \right]} \quad (3)$$

Donde G_B es la irradiancia directa (W/m^2), G_{Bn} es la irradiancia normal directa (W/m^2), α es el ángulo de altitud solar (rad), Φ es el ángulo cenit solar (rad), L es la latitud local (rad), δ es la declinación (rad), h es la hora solar (rad), A es la irradiancia a las afueras de la atmósfera (W/m^2), B es el coeficiente de extinción atmosférico (adimensional), P/P_0 es la presión en una localidad dada en relación con presión atmosférica standard ($P_0 = 101325$ Pa).

2.2. Bloque 2

$$\eta_o = \rho \tau \alpha' \gamma [(1 - A_f \tan \theta) \cos \theta] \quad (4)$$

$$Q_u = F_R \cdot [G_B \cdot \eta_o \cdot A_a - A_r U_L (T_i - T_a)] \quad (5)$$

$$U_L = \left[\frac{A_r}{h_w + h_{r,c-a}} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right]^{-1} \quad (6)$$

Donde η_o es eficiencia óptica del PTC (adimensional), ρ es la reflectividad de la parábola (adimensional), τ es la transmitancia del tubo de vidrio (adimensional), α' es la absortividad del tubo receptor (adimensional), γ es el factor de intercepción (adimensional), A_f es factor geométrico del PTC (adimensional), θ es el ángulo de incidencia solar (rad), Q_u es la energía colectada por el PTC (W), F_R es factor de eliminación del calor (adimensional), A_a es el área de apertura del PTC (m²), A_r es el área externa del tubo receptor (m²), U_L es el coeficiente global de pérdida de calor (W.m⁻².K⁻¹), T_i es la temperatura de entrada del HTF (K), T_a es la temperatura ambiente (K), h_w son las pérdidas por convección al ambiente (W.m⁻².K⁻¹), $h_{r,c-a}$ es el coeficiente linealizado de calor por radiación desde el tubo de vidrio hacia el ambiente (W.m⁻².K⁻¹) y $h_{r,r-c}$ es el coeficiente linealizado de calor por radiación desde el tubo receptor hacia el tubo de vidrio (W.m⁻².K⁻¹).

2.3. Bloque 3

$$T_{s-n} = T_s + \frac{\Delta t}{m_s c p_s} [Q_u - Q_L - (UA)_s (T_s - T_a)] \quad (7)$$

Donde T_s es temperatura del HTF dentro del TES en un tiempo dado (K), T_{s-n} es la nueva temperatura (K) del fluido después de un intervalo de tiempo Δt (seg), m_s es la masa del fluido dentro del TES (kg), $c p_s$ es el calor específico del fluido (J.K⁻¹.kg⁻¹) y $(UA)_s$ es coeficiente global de transferencia de calor del tanque acumulador de inercia multiplicado por el área del mismo (W/K).

2.4. Bloque 4

$$Q_L = U_{HX} A_{HX} \Delta T' \quad (8)$$

Donde U_{HX} es el coeficiente global de intercambio de calor del HX (Kcal.m⁻².K⁻¹.h⁻¹), A_{HX} es el área del HX (m²) y $\Delta T'$ es la diferencia de temperatura entre las corrientes del HX (K), se asume que la fuerza impulsora es constante a lo largo de todo el intercambiador de calor.

2.5. Bloque 5

$$Q_L = F \cdot c p_m \cdot \Delta T \quad (9)$$

$$A_t = \left(\frac{F c p_m}{U_D} \right) N S \ln \left(\frac{\Delta T - EPE}{\Delta T_e} \right) \quad (10)$$

Donde F es el flujo de alimentación de agua de mar (kg/h), cp_m es el calor específico del agua de mar ($\text{Kcal.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), ΔT es el incremento de temperatura del agua de mar en el intercambiador de calor (K), A_t es el área total de transferencia de calor de todo el desalador (m^2), U_D es el coeficiente global de transferencia de calor del desalador ($\text{Kcal.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{h}^{-1}$), NS es número de etapas ideales de flasheo (adimensional), EPE es la elevación del punto normal de ebullición de la salmuera (K) y ΔT_e es la diferencia de temperatura efectiva en cada etapa para la recuperación de calor (K).

2.6. Implementación del algoritmo

Las Ecuaciones 1-10 antes definidas permiten formular el modelo del sistema completo como un problema de programación matemática no-lineal optimizando la variable Costo (ver Ecuación 11) asociada al área de apertura del PTC, al área total de transferencia de calor de todo el desalador, al área de las cámaras del desalador (AS, en m^2), al área del HX y al volumen del acumulador de inercia (V_{tk} , m^3). Para esta función se consultaron las siguientes referencias: Voros et al. (1998), Scenna y Mussati (2008), Henao (2005) y Towler y Sinnott (2012).

$$\text{Costo} = 150.A_a^{0.95} + 50.(A_t + 20.AS) + 1,95.10^{(2,1138 + 0,9658.\log_{10} A_{HX})} + (5700 + 700.V_{tk}^{0.7}) \quad (11)$$

El conjunto de Ecuaciones 1-10 y las aquí no mencionadas forman las restricciones de igualdad, $h(x)$, y desigualdad, $g(x)$ del problema matemático que queda planteado de la siguiente manera:

minimizar *Costo*

$$\text{sujeto a: } \begin{cases} h(x) = 0 \\ g(x) \leq 0 \end{cases}$$

Para resolver el problema de optimización, el mismo se implementa en el software GAMS mediante el solver CONOPT (Drud, 1996).

3. Resultados y discusión

3.1. Irradiancia mensual

A partir del modelo matemático del bloque 1 se calcula la irradiancia directa sobre una superficie horizontal para la región de Dhahran, Arabia Saudita, para el día medio de cada mes del año (ver Figura 2). Los meses de menor irradiancia son diciembre, enero y noviembre; en ese orden.

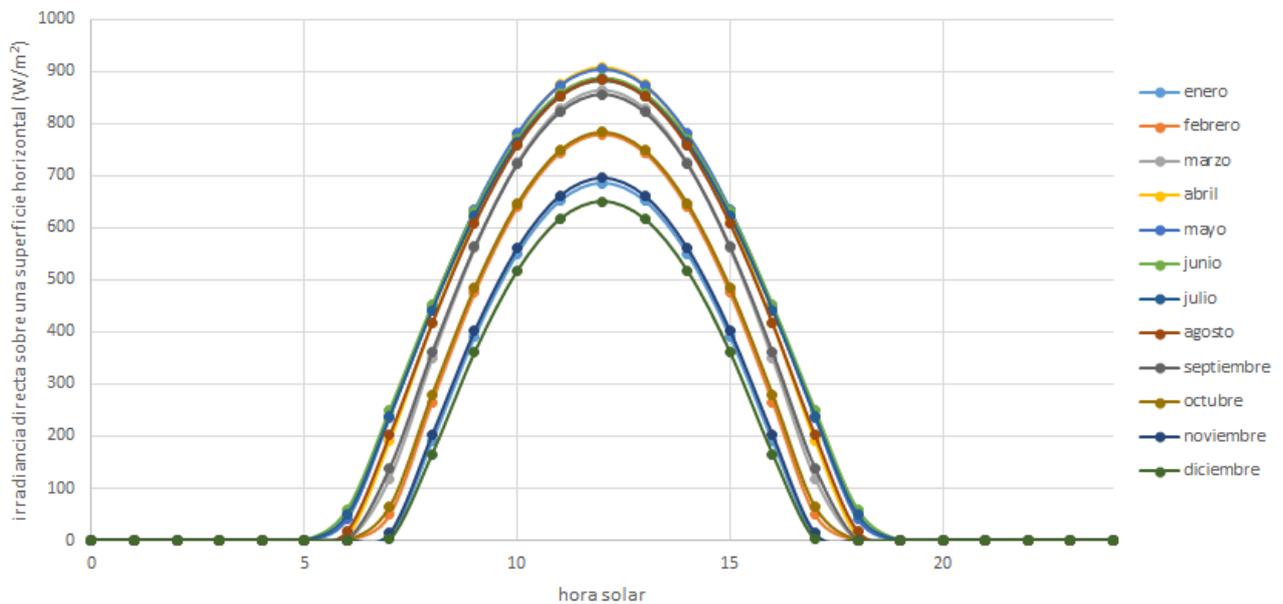


Figura 2. Irradiación mensual para la región de Dhahran, Arabia Saudita

3.2. Análisis paramétrico

A partir de aquí se optimizará el sistema completo. Para ello ciertos parámetros son adoptados (ver Tabla II). Para la reflectividad, la transmitancia, la absorptividad y la emisividad se siguieron los lineamientos de Forristall (2003); la temperatura y la velocidad del viento se tomaron de Weather Spark (2019); el coeficiente UA del tanque se tomó de Kalogirou (2014); y los parámetros correspondientes al desalador fueron obtenidos de El-Dessouky et al. (1998), que corresponden a la región del Golfo Pérsico.

Tabla II. Principales parámetros del modelo

Parámetro	Valor adoptado
Reflectividad de la parábola del PTC (adimensional)	0,9
Transmitancia del tubo de vidrio del PTC (adimensional)	0,97
Absortividad del tubo receptor del PTC (adimensional)	0,98
Emisividad del tubo de vidrio del PTC (adimensional)	0,86
Temperatura ambiente promedio (K)	según el mes analizado
Velocidad del viento promedio (m.s ⁻¹)	según el mes analizado
Coficiente UA del tanque (W.K ⁻¹)	11
Diferencia de temperatura entre las corrientes del HX (K)	10
Elevación del punto normal de ebullición de la salmuera (K)	2
Coef. global de transf. de calor del desalador (Kcal.m ⁻² .K ⁻¹ .h ⁻¹)	1719,69
Temperatura de ingreso al desalador del agua de mar (K)	303

La temperatura de salida del agua de mar del HX y el número de etapas del desalador son dos parámetros no mencionados en la Tabla II. Se realizó un análisis paramétrico de los mismos, considerando el mes de julio, a fin de seleccionar los valores óptimos de los mismos (ver Figura 3). A partir de los resultados se adoptarán los valores de 11 etapas y 383 K.

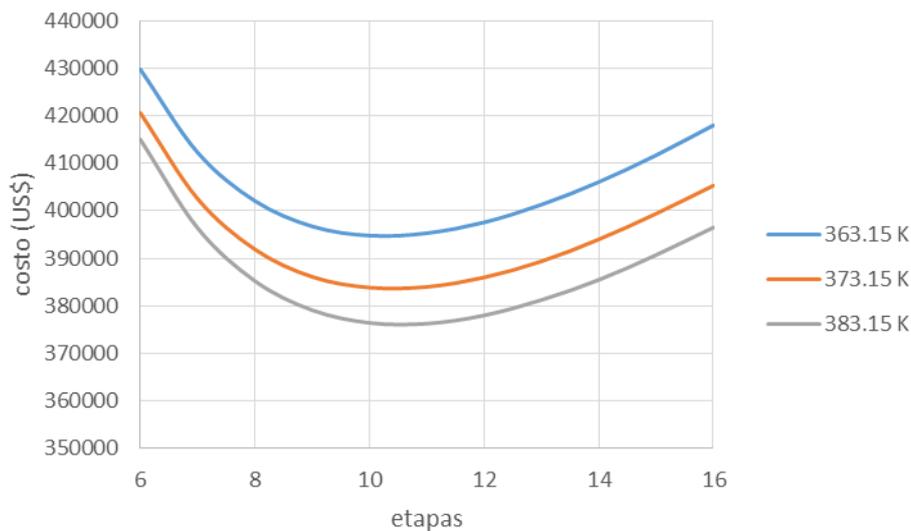


Figura 3. Costo vs número de etapas del desalador en función de la temperatura del agua de mar.

3.3. Análisis mensual

Si se optimiza todo el sistema para una producción de agua potable de 100 m³/día a fin de analizar las variables principales en función del mes dado se obtienen los resultados mostrados en la Tabla III. En negrita se señalan los valores máximos de cada variable. Se observa que, exceptuando el área del intercambiador de calor, todos los máximos corresponden al mes de diciembre. Aun cuando dicho mes no presente la mayor área del HX se aprecia una mínima diferencia de dicho mes respecto al resto del año. Por ende, el valor de diciembre puede ser utilizado. Aquí se comprueba que se deben diseñar los equipos considerando el mes de menor irradiancia, de manera tal que el sistema completo pueda producir el caudal de agua potable deseado durante todo el año.

Tabla III. Efecto del mes en las variables principales

Mes	Volumen del TES (m ³)	Área del HX (m ²)	Área total de transferencia de calor de todo el desalador (m ²)	Área de las cámaras del desalador (m ²)	Área de apertura del PTC (m ²)
Enero	159,97325	17,295	885,11	167,66	3913,3
Febrero	127,567	17,43	821,113	163,829	3161,9
Marzo	97,458	17,519	770,447	160,776	2354,326

Abril	83,388447	17,586	740,7491	159,0104	2039,866
Mayo	107,804	17,606	731,083	158,429	1847,831
Junio	92,25	17,617	726,423	158,166	1804,418
Julio	94,504	17,609	729,882	158,364	1845,516
Agosto	91,500427	17,502	779,198	161,325	2238,303
Septiembre	112,97571	17,415	821,9036	163,8944	2763,636
Octubre	142,47745	17,282	886,3979	167,7662	3485,314
Noviembre	179,84063	17,117	966,98	172,603	4399,3
Diciembre	206,75561	16,918	1063,6499	178,4048	5057,7

3.4. Optimización en función de la producción de agua potable

A continuación, se analizarán distintos caudales de producción de agua potable para ver su efecto en las variables de diseño principales del sistema (ver Tabla IV). Tomando en cuenta los resultados anteriores en todos los casos se optimizará para el mes de diciembre, la temperatura máxima del agua de mar será de 383 K y el número de etapas del desalador será de 11.

Tabla IV. Optimización en función de la producción de agua potable

Población (personas)	Producción de agua potable (m ³ /día)	Costo de inversión [US\$]	Costo del agua [US\$/m ³]
250	58,75	389049,302	0,907139148
350	82,25	483025,06	0,804471932
450	105,75	574656,091	0,744397281
550	129,25	664549,564	0,704326397
650	152,75	753170,184	0,675443521
750	176,25	840711,098	0,653423568
850	199,75	927302,585	0,635933674
950	223,25	1012913,01	0,621523884

Tabla IV. Optimización en función de la producción de agua potable (cont.)

Área del HX (m ²)	Área total de transferencia de calor de todo el desalador (m ²)	Área de las cámaras del desalador (m ²)	Área de apertura del PTC (m ²)
10,2	502,099	150,21	1860,392
14,3	685,019	158,326	2601,58
18,438	864,844	165,502	3343,49
22,559	1042,392	172,005	4085,92
26,683	1218,391	178,08	4828,408
30,811	1393,043	183,78	5571,01
34,942	1566,473	189,135	6313,882
39,066	1738,537	194,204	7055,392

Tabla IV. Optimización en función de la producción de agua potable (cont.)

Volumen del TES (m ³)	CO ₂ no emitido (tn)	Utility no usada (US\$)	Producción por día por unidad de área de apertura (L.m ⁻² .dia ⁻¹)
73,124	7.60E+03	1.00E+06	3,157937E-02
103,935	1.07E+04	1.40E+06	3,161540E-02
135,279	1.37E+04	1.81E+06	3,162863E-02
167,044	1.68E+04	2.21E+06	3,163302E-02
199,429	1.99E+04	2.62E+06	3,163569E-02
232,337	2.29E+04	3.02E+06	3,163699E-02
265,573	2.60E+04	3.43E+06	3,163664E-02
299,03	2.91E+04	3.83E+06	3.164247E-02

Para el cálculo de utility no usada (US\$/día) se utilizó un costo de 7,78 US\$/GJ que corresponde a un servicio de baja presión (160 °C), tomado de Luyben (2011); para el cálculo del CO₂ no emitido se supuso un reemplazo del PTC por una caldera a gas natural cuyo poder calorífico inferior se asumió en 8750 kcal/m³, adquirido de Cleveland y Morris (2013); para el cálculo de la producción de agua potable se utilizó el valor de 235 (L.m⁻².dia⁻¹) de consumo de agua, tomado de Abderrahman (2006); por último todos los cálculos que no dependen del tiempo fueron estimados para la duración completa del proyecto, a saber 20 años, al igual que en Kalogirou (1997).

Por supuesto que faltan muchos costos del proyecto que no han sido contemplados en el costo de inversión mencionado, por ejemplo: bombas, cañerías, válvulas, operación, mantenimiento, terreno, electricidad, instalación, etc. Por lo tanto, estos valores de costos por m³ de agua potable producida son provisorios, ahora bien, teniendo en cuenta que no hay costos de materias primas, aun cuando el precio final se duplique, el proyecto seguiría siendo alentador. En Fichtner y DLR (2011) puede observarse que para el Golfo pérsico el costo del agua desalinizada es de 0,84 US\$/m³ si se utiliza un MSF, de 1,21 a 1,34 US\$/m³ si se utiliza la desalación por destilación múltiple efecto, y de 1,23 a 1,36 US\$/m³ si se utiliza osmosis inversa. Además, en todos los casos el costo ahorrado del servicio de calentamiento no utilizado supera al doble o al triple del costo (subestimado) de inversión de la planta completa. Pero esto no es todo, ya que el proyecto permite la no emisión de varias toneladas de dióxido de carbono, causantes del calentamiento global.

4. Conclusión

Se propone el acople de un colector solar cilindro-parabólico a un sistema que incluya un acumulador de inercia, un intercambiador de calor y un desalador flash de múltiples etapas con el objetivo de desalinizar agua marina de manera sustentable. Luego de analizar la disponibilidad de energía solar en la región escogida y de adoptar ciertos parámetros, se procede a la optimización del sistema considerando distintos niveles de producción de agua potable. A partir de los

resultados obtenidos se concluye que un proyecto de un desalador asistido exclusivamente por energía solar para la región de Arabia Saudita es además de sustentable, rentable. La limitación en el enfoque aplicado recae en que, a mayor producción, mayores serán las áreas y volúmenes de los equipos a utilizar, y por ende en los terrenos que estos ocupan.

Bibliografía

- Abderrahman, W. A. (2006). Water management in ArRiyadh. *Water Resources Development*, 22(2), 277-289
- Abouhashish, M., (2017). Applicability of aHRAE clear-sky model based on solar-radiation measurements in Saudi Arabia. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1850. No. 1. AIP Publishing
- Cleveland, C. J., Morris, C. G. (2013). *Handbook of Energy: Diagrams, Charts, and Tables (Vol. 1)*. Newnes.
- Drud, A. (1996). CONOPT: A system for large scale nonlinear optimization. ARKI Consulting and Development A/S, Bagsvaerd, Denmark.
- El-Dessouky, H., Alatiqi, I., Ettouney, H. (1998). Process synthesis: the multi-stage flash desalination system. *Desalination*, 115(2), 155-179.
- Fichtner and DLR (2011). MENA regional water outlook, Part II Desalination Using Renewable Energy. Final report, commissioned by the World Bank
- Forristall, R. (2003). Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver (No. NREL/TP-550-34169). National Renewable Energy Lab., Golden, CO. (US).
- GWl DesalData & IDA (Int. Desal. Association) (2017).
- Henao, C. A. (2005). *Simulación y evaluación de procesos químicos*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Kalogirou, S. A., (2014). *Solar Energy Engineering (Second Edition)*, Academic Press.
- Kalogirou, S. (1997). Economic analysis of a solar assisted desalination system. *Renewable energy*, 12(4), 351-367.
- Luyben, W.L., (2011). *Principles and Case Studies of Simultaneous Design*. John Wiley & Sons, Inc.
- Rodríguez, N., (2015). *Síntesis de procesos complejos minimizando el impacto ambiental. Aplicación a procesos de cogeneración de vapor y energía eléctrica y sistemas de desalación de aguas acoplados a uno de generación eléctrica*. Tesis doctoral. UTN FRRo.
- Scenna, N., Mussati, S. (2008). MSF design taken into account availability. *Desalination*, 222 (1-3), 673-681.
- Towler, G., Sinnott, R. (2012). *Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design*. Elsevier.
- Voros, N. G., Kiranoudis, C. T. Maroulis, Z. B. (1998). Solar energy exploitation for reverse osmosis desalination plants. *Desalination*, 115(1), 83-101.
- Weather Spark (2019). Web: <https://weatherspark.com/m/104950/7/Average-Weather-in-July-in-Dhahran-Saudi-Arabia>. Último acceso 15 de agosto del 2019.