

Aportaciones de la desalación solar térmica y el control automático al suministro de agua en invernaderos.

Juan D. Gil¹, Lidia Roca², Manuel Berenguel¹, Guillermo Zaragoza²

¹Centro Mixto CIESOL, ceiA3, Universidad de Almería.

{juandiego.gil,beren}@ual.es

²Centro Mixto CIESOL, CIEMAT-Plataforma Solar de Almería.

{lidia.roca,guillermo.zaragoza}@psa.es

Resumen

La escasez de agua en la cuenca del Mediterráneo afecta directamente a uno de sus principales sectores económicos, la agricultura. Por ello, se deben buscar nuevas soluciones que aseguren el suministro del agua requerida por los cultivos de una forma eficiente y sostenible. El acceso a agua de mar o salobre, así como la abundante disponibilidad de irradiancia solar en la zona Mediterránea, colocan a los procesos de desalación térmica a la cabeza de las posibles soluciones. En este trabajo, se estudia el acoplamiento de una planta de destilación por membranas alimentadas con energía solar y un invernadero, usando una técnica de control predictivo no lineal para optimizar en tiempo real la operación de la planta en términos de eficiencia térmica, al mismo tiempo que se satisface la demanda de agua del invernadero.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, dos de los principales problemas que debe afrontar la humanidad son la escasez de agua y el cambio climático. Por esta razón, la gestión racional de las reservas de agua dulce, y el fomento del uso de fuentes de energías renovables se han convertido en factores claves para desarrollo mundial. En este sentido, los sistemas de desalación térmica impulsados con energía solar representan una solución eficiente y sostenible para el suministro de agua de regadío en plantaciones agrícolas, especialmente en regiones áridas con grandes extensiones de cultivos, como es el caso de los países costeros del Mediterráneo.

Uno de los métodos de cultivo más empleados en las explotaciones agrícolas del área del Mediterráneo son los invernaderos. Este sistema de plantación permite controlar la productividad por medio de la adecuada manipulación de la cantidad de agua y fertilizantes utilizados para el riego, así como de las variables medioambientales. De esta forma, el uso de invernaderos se ha extendido rápidamente, contribuyendo a la sobreexplotación de los recursos hídricos de la zona [11, 4]. En consecuencia, la sostenibilidad de las actividades agrícolas en la zona del Mediterráneo está com-

prometida, y es necesario por tanto, la búsqueda de fuentes hídricas alternativas.

Las tecnologías de desalación térmica alimentadas con energía solar se posicionan como una de las alternativas más apropiadas para combatir la escasez de agua en zonas con buenas condiciones de irradiancia solar y acceso a agua de mar o salobre, como es el caso de la cuenca del Mediterráneo. La destilación por membranas con apoyo de energía solar (SMD, *Solar Membrane Distillation*) es una tecnología en fase de investigación, adecuada para el desarrollo de pequeñas plantas autosuficientes de desalación [19]. Esta tecnología destaca por su baja temperatura de operación, la cual, permite que sea fácilmente combinable con tecnologías solares.

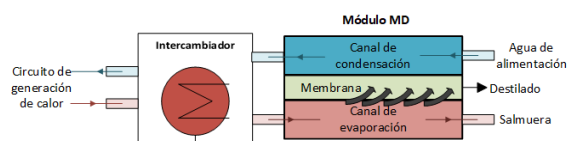


Figura 1: Diagrama esquemático del módulo MD.

La destilación por membranas (MD, *Membrane Distillation*) es un proceso impulsado térmicamente, en el que la fuerza impulsora es la diferencia de presión de vapor que se produce entre ambos lados de una membrana microporosa e hidrófoba. Como se puede apreciar en la Fig. 1, el agua de alimentación entra al módulo MD por el canal de condensación. Cuando alcanza el intercambiador de calor, se calienta con el fluido proveniente del circuito de generación de calor. Posteriormente, el agua de alimentación caliente se circula hacia el canal de evaporación, en el cual, los componentes volátiles se evaporan y pasan a través de la membrana mientras que los componentes no volátiles son rechazados (salmuera en Fig. 1). Existen varias configuraciones dentro de la tecnología MD, siendo la Destilación por Membranas con Canal de Permeado (PGMD, *Permeate Gap MD*), configuración empleada en este trabajo, una de las más usadas [1]. Sin embargo, a pesar de su amplia gama de buenas características, la tecnología SMD tiene una serie de desventajas que han dificultado

hasta el momento su comercialización a nivel industrial [9]. Uno de los principales inconvenientes radica en la baja eficiencia térmica del proceso de destilación.

La mayor parte de los trabajos existentes hasta el momento en la literatura, se centran en optimizar la operación de la planta de desalación atendiendo a objetivos como la maximización de la producción de destilado [14, 5, 7] o de la eficiencia térmica [3, 10, 15, 5]. Sin embargo, solo en [16, 8] se proponen técnicas de optimización en tiempo real para la operación de una planta de destilación con el fin de satisfacer una demanda de agua determinada.

En este trabajo se exponen algunos resultados preliminares alcanzados en simulación mediante el uso de una técnica de control predictivo no lineal que tiene como objetivo optimizar la operación, en términos de eficiencia térmica, de una planta formada por una instalación SMD y un invernadero. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto como los procesos de desalación térmica son capaces de suministrar el agua requerida por los invernaderos, al mismo tiempo que el sistema de control automático es capaz de maximizar la eficiencia térmica de la operación. Los ahorros de energía térmica obtenidos (mayores del 6 %) posibilitan el desarrollo de diseños más óptimos, y por tanto, más competitivos desde el punto de vista económico.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

El diagrama esquemático del sistema propuesto se presenta en la Fig. 4. Como se puede apreciar, la planta está formada por una instalación SMD conectada a un invernadero. Por un lado, el invernadero tiene una demanda de agua de riego diaria variable en función de las condiciones meteorológicas. Por otro lado, la instalación de desalación solar produce el agua dulce necesaria a través de módulos de destilación por membranas (MD, *Membrane distillation*). La interconexión de los dos sistemas se realiza por medio de un tanque de almacenamiento de destilado de 3 m³. Se debe tener en cuenta que la instalación propuesta es un caso de estudio en simulación, basado en dos instalaciones reales, las cuales se describen en las siguientes subsecciones.

2.1. Planta SMD

La instalación piloto de destilación por membranas solar se encuentra en la Plataforma Solar de Almería (PSA, www.psa.es), y está totalmente descrita en [19]. En ella, el módulo MD se conecta con el circuito de generación de calor a través de

un intercambiador de calor, el cual es usado para calentar el agua de alimentación. Posteriormente, el intercambiador de calor se conecta directamente con un tanque de almacenamiento térmico (1500 L), el cual se utiliza como *buffer* energético con el fin de rechazar perturbaciones provocadas por variaciones en la irradiancia o transitorios. Por último, el tanque de almacenamiento está conectado con un campo solar térmico compuesto por colectores de placa plana. Las principales variables que intervienen en el proceso se muestrean a través de un sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) con un periodo de muestreo de 1 s. Se debe hacer notar que en este trabajo no se consideran otras fuentes de calor a parte de la energía solar.

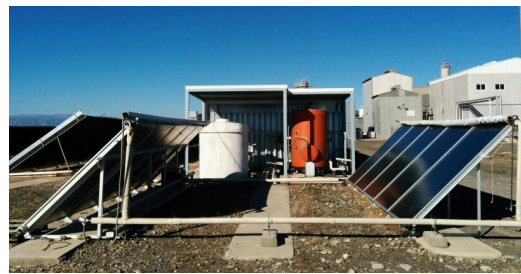


Figura 2: Instalación piloto SMD en la PSA.



Figura 3: Instalaciones del invernadero. Desde la izquierda hacia la derecha y desde arriba hacia abajo: invernadero, pipeta de riego y líneas de cultivo de tomates.

2.2. Invernadero

El invernadero empleado como planta de referencia en este trabajo se encuentra situado en la Estación Experimental de Investigación de Cajamar (El Ejido, Almería). La superficie total del invernadero es de 800 m², con un área aprovechable para el cultivo de 616 m². La cubierta del invernadero es de polietileno, y está equipada con un sistema de ventilación automática con ventanas distribuidas en las paredes norte y sur. Las plantaciones crecen en sacos de fibra de coco equipados con tres goteros cada uno y con capacidad para seis plantas. Del mismo modo que en la instalación SMD, las

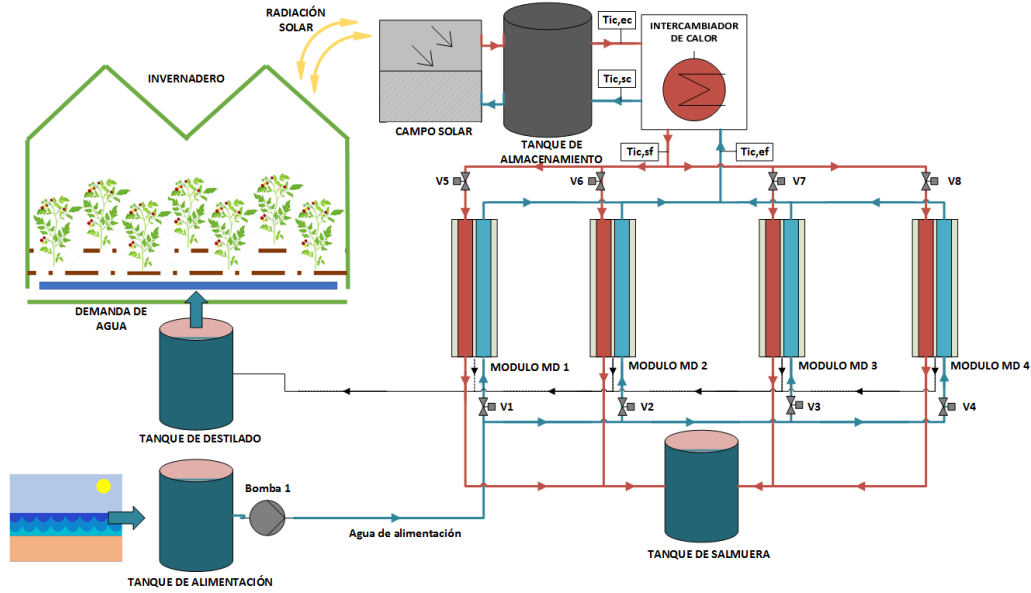


Figura 4: Diagrama esquemático de la instalación simulada como caso de estudio.

principales variables se muestrean a través de un SCADA con un periodo de muestreo de 30 s.

3. Modelado del sistema

Para la simulación del sistema se han desarrollado modelos dinámicos para estimar el comportamiento de la instalación propuesta, los cuales tienen en cuenta tanto los valores de radiación en cada instante como las distintas condiciones de operación posibles. Los modelos del sistema de generación de energía de la planta SMD están descritos en [7], mientras que los modelos del módulo MD fueron presentados en [18]. Por otra parte, los modelos relacionados con el invernadero están descritos en [17].

4. Caracterización de la operación óptima de los módulos MD

En la literatura se plantean diferentes métodos para evaluar la eficiencia energética de los módulos MD, siendo el STEC (*Specific Thermal Energy Consumption*) una de las métricas más empleadas:

$$\text{STEC} [\text{kWh}/\text{m}^3] = \frac{Q \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{c_f \cdot D}, \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del agua (kg/m^3), c_p es la capacidad calorífica del agua ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$), c_f es un factor de conversión ($3.6 \cdot 10^6 \text{ J}/\text{kWh}$), Q es el caudal de alimentación del módulo MD (L/h), D es la producción de destilado (L/h) y ΔT es la diferencia de temperatura entre la salida del canal frío y la entrada del canal caliente del módulo MD ($^\circ\text{C}$).

Por tanto, el STEC es un índice que mide la cantidad de energía térmica necesaria para producir una unidad de volumen de destilado.

La eficiencia térmica de cada módulo MD cambia en función de su diseño interno y de la configuración empleada. Por tanto, las condiciones de funcionamiento que permiten maximizar la eficiencia térmica deben ser caracterizadas para cada caso en particular. Así, para hallar los puntos de funcionamiento óptimos del módulo PGMD usado en el presente trabajo se han realizado gráficas de superficie, en las cuales, la producción de destilado y el STEC se representan frente a las dos variables que afectan de forma más significativa a su comportamiento: el caudal de alimentación (Q) que tiene un rango de funcionamiento de 400 a 600 L/h , y la temperatura a la salida del intercambiador de calor por la parte fría ($T_{ic,sf}$) que tiene un rango de funcionamiento de 60 a 80 $^\circ\text{C}$. Se debe hacer notar que el límite de temperatura máxima lo marca el límite térmico de los materiales con los que están construidas las membranas del módulo de destilación, mientras que operaciones con temperaturas por debajo de 60 $^\circ\text{C}$ no son rentables en términos económicos, debido a la baja producción de destilado de los módulos.

Los puntos de funcionamiento óptimos en cuanto a eficiencia térmica son aquellos que tienen un valor de STEC más bajo, lo que significa que se necesita menos cantidad de energía térmica para producir una unidad de volumen de destilado. Tal y como se puede apreciar en la Fig. 6, el punto de eficiencia térmica máxima se obtiene trabajando a máxima temperatura y mínimo caudal. Por el contrario, como se puede apreciar en la Fig. 5 la

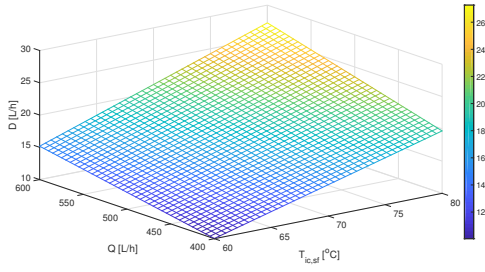


Figura 5: Gráfica de superficie de la producción de destilado.

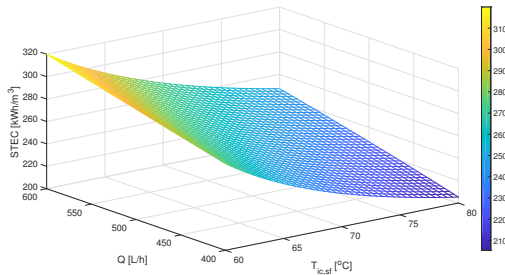


Figura 6: Gráfica de superficie del STEC.

máxima producción del módulo se obtiene trabajando a máxima temperatura y máximo caudal. Por tanto, para maximizar la eficiencia térmica de la operación (minimizar el STEC) así como la producción de destilado, se requieren condiciones de operación opuestas en el caudal de alimentación de los módulos.

5. Sistema de control propuesto para la operación automática de la instalación

De acuerdo al análisis de funcionamiento del módulo MD realizado en la sección anterior, para trabajar en los puntos de eficiencia energética máxima, y por tanto, aprovechar al máximo la energía suministrada por el campo solar, el caudal de alimentación del módulo MD se debe mantener al mínimo. Sin embargo, para cubrir los requerimientos de agua del invernadero, se debe aumentar la producción de destilado en determinados momentos, haciendo que la eficiencia energética de la operación disminuya. Este hecho remarca la necesidad de desarrollar técnicas de optimización en tiempo real que gestionen de forma óptima el caudal de alimentación de cada módulo MD (Q_1 , Q_2 , Q_3 y Q_4), en función de las condiciones de operación y los requerimientos de agua del invernadero. El sistema de control propuesto está basado en un algoritmo de control predictivo PNMPC [13]. Además, este algoritmo se complementa con

un método para predecir la radiación de acuerdo a las ideas presentadas en [12]. El diagrama esquemático del sistema de control se presenta en la Fig. 7.

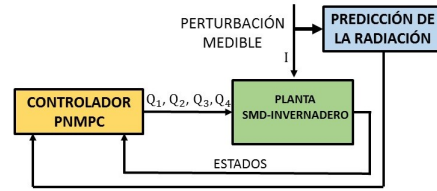


Figura 7: Esquema del controlador PNMPC

De este modo, el algoritmo PNMPC se utiliza para predecir el nivel del tanque de destilado y el STEC medio de los cuatro módulos MD que componen la planta, en función de las señales de control futuras. Las señales de control futuras se obtienen mediante la resolución de un problema de optimización lineal que tiene como objetivo maximizar la eficiencia térmica de la planta y asegurar el suministro de agua para el invernadero. Para este último propósito, se trata de mantener el nivel del tanque de almacenamiento de destilado en un nivel mayor o igual a 1500 L, lo que aseguraría el abastecimiento del invernadero durante dos días, ya que el consumo medio por día es de alrededor de 750 L. La descripción detallada del sistema de control propuesto fue presentada en [6].

6. Resultados

A continuación, se muestran resultados representativos en simulación con el fin de analizar la actuación del sistema de control propuesto. Para simular el sistema, se han utilizado datos meteorológicos de la Estación Experimental de la Fundación Cajamar, del día 1 de abril de 2015.

En la Fig. 8-1 se muestra la curva de irradiancia (línea naranja) y el STEC medio de los cuatro módulos durante la operación (línea azul). En la Fig. 8-2 se muestra la demanda de agua del invernadero (línea verde), la producción de destilado de los módulos de destilación (línea roja), el objetivo de nivel a mantener en el tanque (línea negra), y el nivel real del tanque (área azul). Como se puede apreciar, la demanda del agua del invernadero tiene un comportamiento acorde con el de la irradiancia. De modo que, el invernadero comienza a demandar agua al inicio de la mañana, haciendo que el nivel del tanque (ver Fig. 8-2) descienda. Se debe tener en cuenta que los módulos MD se arrancan cuando estos se pueden operar con una temperatura mayor de 60 °C (instante 10.45 h, ver Fig. 8-2), con el objetivo de obtener una operación rentable en térmicos económicos, tal y como se ha mencionado en secciones anteriores. En el instante

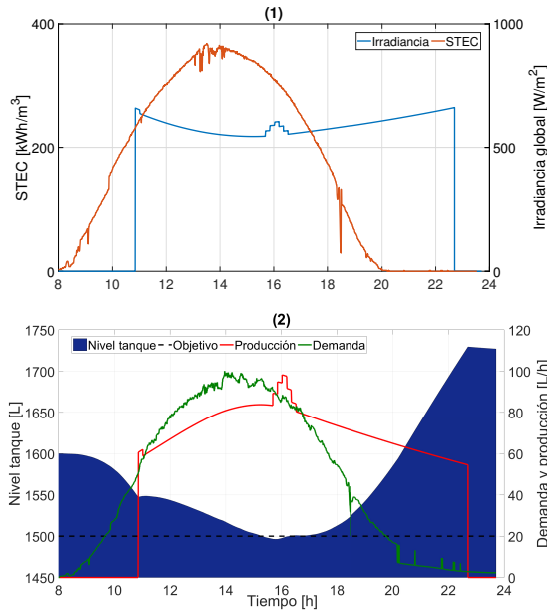


Figura 8: Resultados obtenidos en simulación.

15.30 h, el nivel real del tanque es menor que el nivel deseado (ver Fig. 8-2), por tanto el sistema de control aumenta la producción de destilado de los módulos MD (ver Fig. 8-2), de modo que el nivel vuelva a estar por encima del nivel mínimo deseado. En la Fig. 8-1 se puede ver como el STEC aumenta de acuerdo al aumento de producción de destilado. En el resto de la operación, el sistema de control mantiene los caudales de alimentación al mínimo, de forma que se obtiene la máxima eficiencia térmica alcanzable en cada instante de la operación. Se debe tener en cuenta la otra variable que influye directamente sobre la producción de destilado y el STEC es la temperatura de entrada en la parte caliente del módulo (temperatura de salida del intercambiador por el lado frío en la Fig. 4), la cual depende de la potencia térmica suministrada por el sistema de generación de energía, y por tanto en este caso, de la irradiancia. En [8] se muestran y se comentan más detalles técnicos acerca de la actuación de la estrategia de control.

Con el objetivo de evidenciar los resultados obtenidos mediante la implantación de la técnica propuesta, estos se han comparado con una operación en las mismas condiciones con los caudales de alimentación fijos a 500 L/h. En la operación con caudales fijos se obtuvo un STEC medio de 252.09 kWh/m³, mientras que en la operación con la estrategia de control se obtuvo un STEC medio de 236.13 kWh/m³, por lo que se necesitan de media 15.97 kWh menos de energía térmica para producir 1 m³ de destilado, lo que implica un ahorro energético de más del 6 %. Se debe tener en cuenta que la instalación propuesta está basada en dos

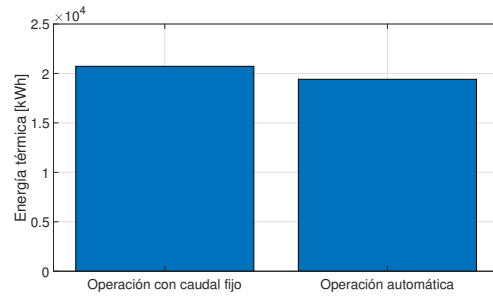


Figura 9: Comparación del consumo energético medio diario para el caso de una plantación de 20 ha.

plantas piloto. En ámbitos industriales los ahorros energéticos pueden ser muy relevantes. De acuerdo al estudio presentado en [2], los cultivos de tomate (uno de los cultivos más extendidos en el área del Mediterráneo) tienen una demanda de agua diaria de 4.11 m³/ha. Por tanto, asumiendo una plantación de 20 ha, superficie típica de una plantación media en la zona del Mediterráneo, el uso de la técnica propuesta puede suponer un ahorro diario medio de 1312 kWh. El consumo energético medio diario de la operación automática (usando la técnica de control propuesta) y la operación con caudales fijos se presenta en la Fig. 9. Este ahorro energético posibilita la realización de diseños de la instalación más óptimos, y por tanto, más competitivos económicamente hablando.

7. Conclusiones y trabajos futuros

Con este trabajo queda demostrado como a través del uso de adecuadas técnicas de control y optimización en tiempo real se puede abastecer mediante sistemas de desalación térmica el agua de regadío requerida por un invernadero, a la vez que se optimiza la operación en términos de eficiencia térmica. Los resultados obtenidos en simulación muestran como se pueden obtener unos ahorros energéticos medios diarios de 15.97 kWh (mayores del 6 %). Estos resultados se han extrapolado a un caso industrial con una superficie de cultivo de tomate 20 ha, mostrando como la aplicación de la técnica propuesta puede suponer un ahorro energético medio diario de 1312 kWh, hecho que posibilita la realización de diseños más óptimos y competitivos desde el punto de vista económico.

Los trabajos futuros estarán centrados en la modificación del algoritmo desarrollado para la realización de diseños óptimos de las plantas SMD, en base a una demanda de agua determinada.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo del

proyecto DPI2014-56364-C2-1/2-R (ENERPRO), financiado por el Ministerio de Economía, Competitividad e Industria y fondos FEDER.

Referencias

- [1] A. Alkudhiri, N. Darwish, and N. Hilal, “Membrane distillation: a comprehensive review,” *Desalination*, vol. 287, pp. 2–18, 2012.
- [2] A. T. Becerra and X. L. Bravo, “La agricultura intensiva del poniente almeriense. diagnóstico e instrumentos de gestión ambiental,” *M+ A. Revista Electrónica de Medioambiente*, no. 8, pp. 18–40, 2010.
- [3] H. Chang, S.-G. Lyu, C.-M. Tsai, Y.-H. Chen, T.-W. Cheng, and Y.-H. Chou, “Experimental and simulation study of a solar thermal driven membrane distillation desalination process,” *Desalination*, vol. 286, pp. 400–411, 2012.
- [4] M. Fernández, A. González, J. Carreño, C. Pérez, and S. Bonachela, “Analysis of on-farm irrigation performance in mediterranean greenhouses,” *Agricultural Water Management*, vol. 89, no. 3, pp. 251–260, 2007.
- [5] J. D. Gil, L. Roca, A. Ruiz-Aguirre, G. Zaragoza, and M. Berenguel, “Optimal operation of a solar membrane distillation pilot plant via nonlinear model predictive control,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 109, pp. 151–165, 2018.
- [6] J. D. Gil, L. Roca, A. Ruiz-Aguirre, G. Zaragoza, J. L. Guzmán, and M. Berenguel, “Using a nonlinear model predictive control strategy for the efficient operation of a solar-powered membrane distillation system,” in *25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2017)*. Valleta, Malta, 2017, (Aceptado).
- [7] J. D. Gil, L. Roca, G. Zaragoza, and M. Berenguel, “A feedback control system with reference governor for a solar membrane distillation pilot facility,” *Renewable Energy*, 2018.
- [8] J. D. Gil, L. Roca, M. Berenguel, A. Ruiz, G. Zaragoza, and A. Gimenez, “Control predictivo para la operación eficiente de una planta formada por un sistema de desalación solar y un invernadero,” in *XXXVIII Jornadas Automática, Gijón, España*, 2017.
- [9] M. Khayet, “Solar desalination by membrane distillation: Dispersion in energy consumption analysis and water production costs (a review),” *Desalination*, vol. 308, pp. 89–101, 2013.
- [10] M. Khayet and C. Cojocaru, “Artificial neural network modeling and optimization of desalination by air gap membrane distillation,” *Separation and Purification Technology*, vol. 86, pp. 171–182, 2012.
- [11] F. S. Martos, A. P. Bosch, and J. Calaforra, “Hydrogeochemical processes in an arid region of europe (almeria, SE Spain),” *Applied Geochemistry*, vol. 14, no. 6, pp. 735–745, 1999.
- [12] A. Pawlowski, J. L. Guzmán, F. Rodríguez, M. Berenguel, and J. E. Normey-Rico, “Predictive control with disturbance forecasting for greenhouse diurnal temperature control,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 1779–1784, 2011.
- [13] A. Plucenio, D. Pagano, A. Bruciapaglia, and J. Normey-Rico, “A practical approach to predictive control for nonlinear processes,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 40, no. 12, pp. 210–215, 2007.
- [14] R. Porrazzo, A. Cipollina, M. Galluzzo, and G. Micale, “A neural network-based optimizing control system for a seawater-desalination solar-powered membrane distillation unit,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 54, pp. 79–96, 2013.
- [15] M. R. Qtaishat and F. Banat, “Desalination by solar powered membrane distillation systems,” *Desalination*, vol. 308, pp. 186–197, 2013.
- [16] L. Roca, J. A. Sánchez, F. Rodríguez, J. Bonilla, A. de la Calle, and M. Berenguel, “Predictive control applied to a solar desalination plant connected to a greenhouse with daily variation of irrigation water demand,” *Energies*, vol. 9, no. 3, p. 194, 2016.
- [17] F. Rodríguez, M. Berenguel, J. L. Guzmán, and A. Ramírez-Arias, *Modeling and control of greenhouse crop growth*. Springer, 2015.
- [18] A. Ruiz-Aguirre, J. Andres-Manas, J. Fernández-Sevilla, and G. Zaragoza, “Modeling and optimization of a commercial permeate gap spiral wound membrane distillation module for seawater desalination,” *Desalination*, vol. 419, pp. 160–168, 2017.
- [19] G. Zaragoza, A. Ruiz-Aguirre, and E. Guillén-Burrieza, “Efficiency in the use of solar thermal energy of small membrane desalination systems for decentralized

water production," *Applied Energy*, vol. 130,
pp. 491–499, 2014.