

## CONTROL DE PLANTAS DE DESTILACIÓN POR MEMBRANAS CON APOYO DE ENERGÍA SOLAR – PARTE 2: RESULTADOS

Juan D. Gil<sup>1</sup>, Alba Ruiz-Aguirre<sup>2</sup>, Lidia Roca<sup>2</sup>, Guillermo Zaragoza<sup>2</sup>, Manuel Berenguel<sup>1</sup>, José Luis Guzmán<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Almería, Centro Mixto CIESOL, ceiA3 ([jgv132@inlumine.ual.es](mailto:jgv132@inlumine.ual.es) ; [beren@ual.es](mailto:beren@ual.es) ; [joseluis.guzman@ual.es](mailto:joseluis.guzman@ual.es))

<sup>2</sup>CIEMAT-Plataforma Solar de Almería, Centro Mixto CIESOL ([alba.ruiz@psa.es](mailto:alba.ruiz@psa.es), [lidia.roca@psa.es](mailto:lidia.roca@psa.es), [guillermo.zaragoza@psa.es](mailto:guillermo.zaragoza@psa.es))

### Resumen

*La destilación por membranas es una tecnología de desalación de agua que todavía no se ha implantado industrialmente y en la que existen numerosas incógnitas sobre su funcionamiento en condiciones intermitentes de operación como las que se pueden alcanzar cuando se usa energía solar como fuente primaria de energía. Una de las pocas plantas piloto que se han descrito en la literatura científica está ubicada en la Plataforma Solar de Almería (PSA). Se presenta aquí la segunda parte de un trabajo de diseño de esquemas básicos de control para este tipo de instalaciones, mostrando resultados de simulación y experimentales de la operación del sistema en modo automático.*

**Palabras Clave:** Destilación por membranas, energía solar, control PID, control anticipativo.

## 4 RESULTADOS EN SIMULACIÓN Y EXPERIMENTALES

En esta sección se muestran resultados obtenidos de la aplicación de los esquemas de control analizados en la primera parte de este trabajo tanto a nivel de simulación como de la planta real. Hay que indicar que la disponibilidad de la instalación para la realización de ensayos de control es limitada debido a su uso por parte de otros grupos de investigación para la caracterización del módulo MD.

### 4.1 Bucle 1: Control de la temperatura de salida del campo solar

Se llevaron a cabo ensayos del tipo curva de reacción en los dos bucles (teniendo en cuenta que la dinámica del bucle esclavo es mucho más rápida que a del lazo externo), obteniendo funciones de transferencia de primer orden con retardo (con un retardo normalizado  $< 0.4$ ). Las funciones de

transferencia de los controladores PID son las ideales:  $C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_{is}} + T_d s \right)$ .

El controlador en cascada ha sido configurado con los siguientes parámetros:

- PI esclavo:  $K_p=2.84$  min/l-% y  $T_i=0.082$  min (método AMIGO, [3]). La constante de tiempo equivalente en bucle abierto está en torno a 5 s y el tiempo de retardo en torno a 1 s.
- PI maestro:  $K_p=-0.42$  °C·l/min y  $T_i=1.21$  min (método SIMC, [26]). La constante de tiempo en bucle abierto está en torno a 66 s y el tiempo de retardo a 16 s.

La figura 12 muestra los resultados que se obtienen en simulación con los modelos lineales en bucle cerrado.

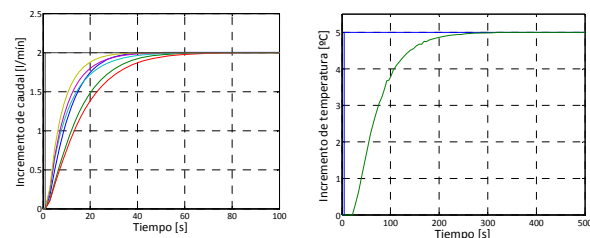


Figura 12: Respuestas incrementales en bucle cerrado en simulación usando los modelos Q1-  $f_{B1}$  y T2-Q1 mostrados en la figura 5.

En todos los casos tratados en este trabajo, los valores son los obtenidos de la aplicación de los métodos indicados modificándolos ligeramente en la implementación real a la vista de los resultados preliminares.

En los ensayos reales se utilizó un filtro en la referencia con una constante de tiempo de 1 min. El caudal se satura entre 7.5 y 19 l/min por restricciones operacionales de la bomba B1. La figura 13 muestra resultados reales de la aplicación del esquema de control del bucle 1. Inicialmente, la temperatura T2 se controla en modo manual hasta alcanzar 65 °C. En ese momento, se activa el control en cascada en torno a las 11:00. Cuando T2 alcanza el estado estacionario (11:10) se cambia la consigna a 70 °C. El controlador

reduce el caudal impulsado por la bomba y T2 alcanza la temperatura deseada con un error en estado estacionario inferior a 0.2 °C (del orden de la resolución del sensor). El tiempo de establecimiento asociado es de 6.1 min. A las 11:20, se activa el controlador FF y a las 11:25 se cambia la referencia a 68 °C. En este caso, el error en estado estacionario es de 0.4 °C con un tiempo de establecimiento de 4.6 min y una sobreoscilación del 20% provocada previsiblemente por el FF (debido a su naturaleza estática y la dinámica no modelada, que también se aprecia en la respuesta de  $Q1_c$ , pues debería encontrarse en torno a 0 y presenta un error negativo). A las 11:42 se incrementó la consigna hasta los 70 °C. En este escalón, el error en estado estacionario es de 0.3 °C, el tiempo de establecimiento de 4 min y la sobreoscilación del 20%. A las 11:55 se provoca un nuevo cambio de la referencia hasta los 75 °C, no apreciándose error en estado estacionario pero sí una sobreoscilación del 25% y un tiempo de establecimiento de 7 min, debido en este caso a una perturbación producida por la temperatura de entrada, debida al circuito de recirculación. A las 12:22 se produce otra perturbación causada por T1, que es adecuadamente

compensada por el bloque FF. Se producen otros dos cambios en la consigna a las 12:44 y las 13:07, obteniendo resultados similares a los ya comentados. Al final del ensayo, el paso de nubes provoca cambios en la irradiancia cuyo efecto es parcialmente compensado por el bloque FF en combinación con el control por realimentación. Hay que hacer notar que el valor de la irradiancia medida se filtra con un filtro paso bajo para eliminar el ruido y evitar que éste entre en el bucle de realimentación. En el control manual de este bucle, en la actualidad se obtienen sobreoscilaciones del 25%, tiempos de establecimiento entre 11 y 24 min y errores en estado estacionario de 2 °C. Por tanto, el esquema de control implementado mejora sustancialmente la operación actual, si bien requiere todavía de bastantes mejoras para intentar reducir los errores de modelado (mejorando por tanto el comportamiento de los controladores diseñados) y reducir la sobreoscilación y el tiempo de establecimiento (a través de una mejor sintonización de los controladores y el incremento del valor de la constante de tiempo del filtro en la referencia para desacoplar más el problema de seguimiento de referencia y el rechazo de perturbaciones).

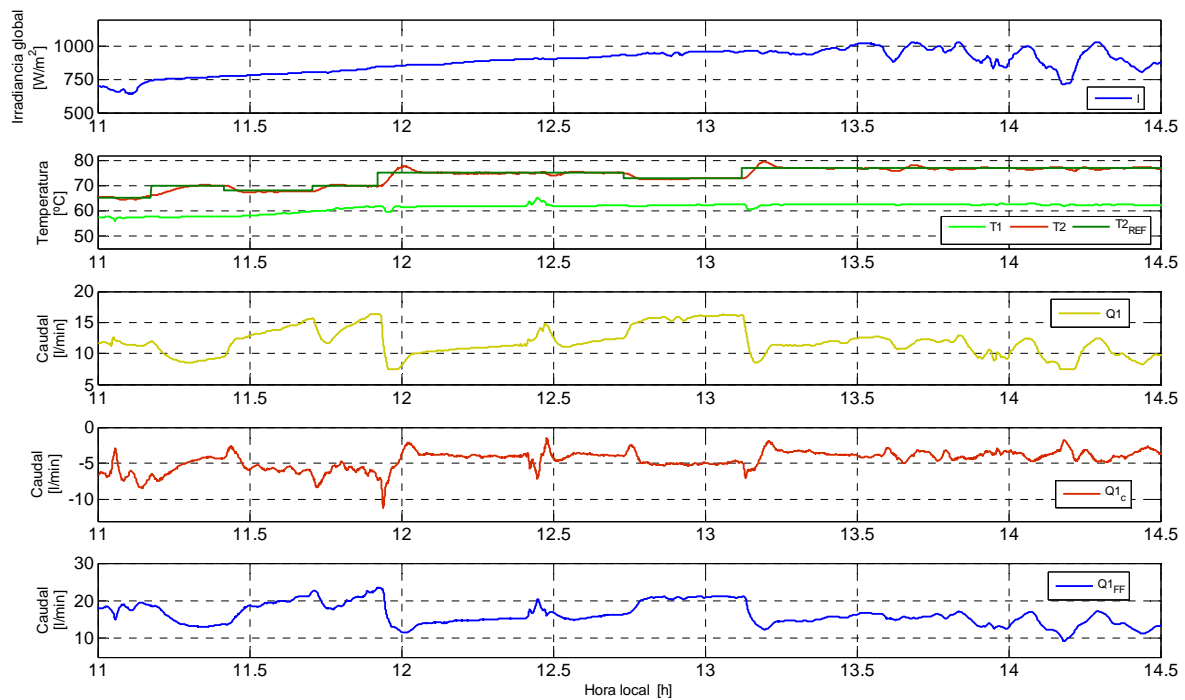


Figura 13: Control del campo solar: (1) irradiancia global (I), (2) temperaturas de referencia (T2ref), entrada (T1) y salida (T2), (3) caudal (Q1), (4) caudal demandado por el controlador por realimentación ( $Q1_c$ ) y (5) caudal demandado por el controlador FF ( $Q1_{FF}$ )

## 4.2 Bucle 2: Temperatura de mezcla aerotermo-campo solar

Los modelos nominales que se han utilizado para el diseño de los controladores por cancelación de polos son:

- Bucle de V5:

$$G_{V1}(s) = \frac{-0.004594s - 3.15e - 5}{s^3 + 0.1327s^2 + 0.0185s + 0.0004923} e^{-39s}$$

- Bucle de aerotermo:

$$G_{fac}(s) = \frac{-0.003955}{s + 0.03639} e^{-25s}$$

El uso del predictor de Smith filtrado se justifica porque el tiempo de retardo normalizado en este bucle es superior a 1. Como se puede comprobar en el esquema de control mostrado en la figura 6 de la primera parte de este trabajo, en el bucle de control de la válvula, se incluye un filtro de primer orden con constante de tiempo igual a la del cero dominante del sistema para cancelar esa dinámica. Los filtros de los bloques FTPO1 y FTPO2 se ajustan según el procedimiento explicado en [23].

La figura 14 representa los resultados en bucle cerrado que se obtienen en simulación con el esquema presentado en la figura 8 de la primera parte de este trabajo.

En este caso únicamente se ha implementado el bloque FF12 de desacoplo (ver figura 6 en la primera parte del trabajo), que permite reducir la interacción que el bucle de la válvula produce sobre el bucle del aerotermo cuando la válvula satura. Este bloque FF es realizable. FF21 no se ha implementado por ahora porque se ha ensayado su versión realizable y los resultados proporcionados no mejoran los que se obtienen sin incluir este bloque.

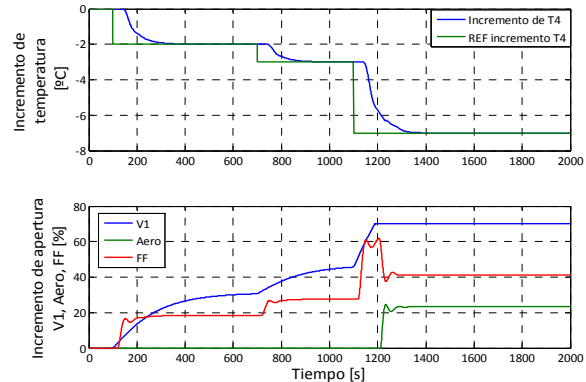


Figura 14: Respuestas incrementales en bucle cerrado en simulación usando los modelos  $G_{V1}(s)$ ,  $G_{fac}(s)$  y FF12.

En la figura 15 se representa el único ensayo disponible de control del bucle 2, operando la válvula V5. El aerotermo se fija en este caso a su valor mínimo (30%).

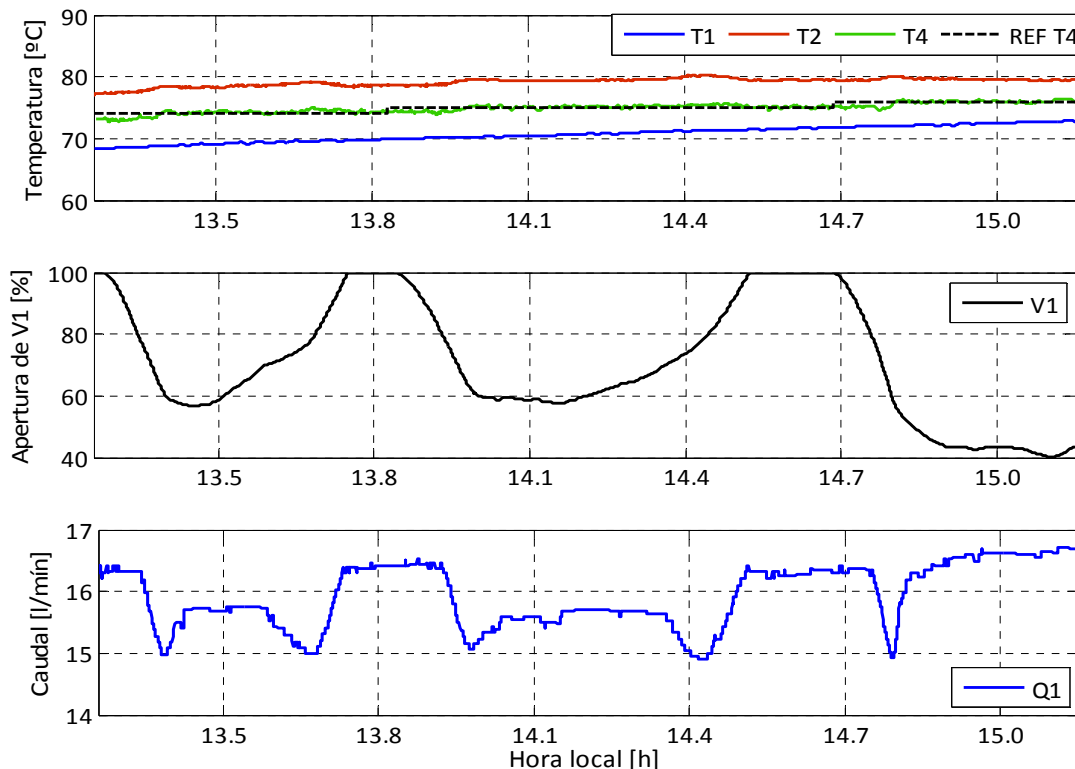


Figura 15. Resultados del bucle 2: (1) temperaturas de referencia (T4ref), salida (T4) y entrada (T1, T2), (2) apertura de la válvula V1, (3) caudal Q1.

El control del campo solar está activado con una referencia de 72 °C, por lo que el variador de frecuencia del caudal de la bomba B1 está saturado. Las variaciones que se aprecian en el caudal Q1 son debidas a las diferentes pérdidas de carga que se establecen en el circuito hidráulico al variar la posición de la válvula de tres vías. Como se puede comprobar en la figura 15, el comportamiento de la válvula es muy lento. La temperatura T4 se controla adecuadamente, apareciendo lógicamente en bucle cerrado el tiempo de retardo del sistema en bucle abierto. A la vista de los resultados, se puede indicar que el control es adecuado, si bien se irá refinando a medida que se puedan realizar más ensayos. Entre otras mejoras a nivel operativo, se va a incluir un filtro en la medida de T4, puesto que presenta mucho ruido. También se va a comprobar por medio de experimentación si la válvula V5 tiene histéresis y si está bien calibrada, para intentar mejorar su comportamiento dinámico.

### 4.3 Bucle 3: Temperatura de entrada al intercambiador de calor del módulo MD

Al igual que en los bucles previos, se han diseñado controladores tipo PI y PID basándose en modelos incrementales obtenidos de respuestas a escalón en bucle abierto. Los parámetros obtenidos son los siguientes:

- Bucle de control de temperatura T10:  $K_p=2.22$  %/°C and  $T_i=0.5$  min (obtenidos mediante el método SIMC mejorado [27]). La constante de tiempo dominante nominal es de 10 segundos y el retardo de 15 segundos. Nótese que se podría haber implementado un esquema basado en predictor de Smith filtrado como en el bucle 2.
- Bucle de control de caudal Q3:  $K_p=5.93$  %·min/l,  $T_i=0.124$  min y  $T_d=0.024$  min (método SIMC, [26]). La constante de tiempo dominante del sistema en bucle abierto es de 8 s y tu tiempo de retardo de 3 s.

La figura 16 representa la respuesta en bucle cerrado que se obtiene en simulación con estos controladores.

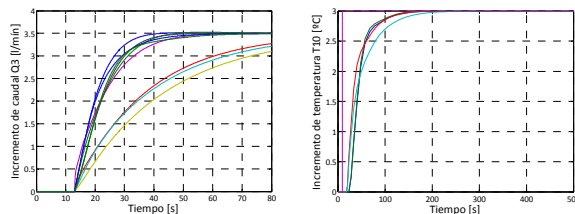


Figura 16: Respuestas incrementales en bucle cerrado en simulación usando los modelos Q3-  $f_{B3}$  y T10-V5.

En los ensayos reales, la apertura de la válvula V5 se limita entre el 50 y el 80% (fuera de esas bandas su comportamiento no es adecuado). El valor máximo se ha obtenido de ensayos realizados en bucle abierto y se ha observado que con mayores aperturas el flujo másico no se ve prácticamente afectado. La restricción mínima se establece para asegurar que existe suficiente flujo en el circuito hidráulico entre el módulo MD y el sistema de distribución evitando de esa forma paradas de la bomba B3. La figura 17 muestra los resultados en los lazos de la bomba B3 y la válvula V5. Inicialmente, ambos bucles se controlan en modo manual ( $V5=57\%$ ,  $f_{B3}=66\%$ ). Poco antes de las 11:30 horas se activan los esquemas de control ( $T10_{ref}=63$  °C,  $Q3_{ref}=10$  l/min). Una vez que se alcanza el estado estacionario, se modifica la consigna de Q3 a 11 l/min, obteniéndose una respuesta en bucle cerrado con un tiempo de establecimiento de 1.1 min y un error en estado estacionario de 0.3 l/min. A continuación, se incrementa la consigna de T10 a 66 °C, obteniendo un tiempo de establecimiento de 3 min, sobreoscilación del 20% y error en estado estacionario de 0.4 °C. Seguidamente se provoca otro cambio en la consigna de Q3 (hasta 10 l/min) con un resultado similar que en el escalón previo. A las 12:10 cambia la referencia de temperatura a 63°C. En este caso, el tiempo de establecimiento es de 7.8 min debido a que la válvula V5 se satura a su valor mínimo (50%), produciendo una temperatura T10 como la media de T8 y T11, limitando la fuente caliente (T8) el enfriamiento del sistema. Hay que hacer notar que T11 actúa como perturbación en este caso, pues su valor depende de T10. A las 12:25 se vuelve a cambiar la consigna a 67 °C, obteniendo un tiempo de establecimiento de 4.2 min, error en estado estacionario de 0.4 °C y una sobreoscilación del 25%. Se vuelven a introducir cambios positivos y negativos de la consigna a las 12:50 y 13:05, obteniendo resultados similares. A las 13:30 se reduce el valor mínimo de apertura de la válvula al 20% con el fin de evaluar la posibilidad de ampliar el rango de actuación y poder alcanzar la consigna en el caso de escalones negativos.

De estos resultados preliminares se puede inferir que el sistema presenta diferente comportamiento en cambios positivos y negativos de la referencia de temperatura, como era de esperar pues el sistema no es lineal. Para mejorar el comportamiento, se van a revisar varios aspectos, como el valor mínimo de V5, resintonización de los controladores en función de que el cambio en la referencia sea positivo y negativo y adición de un filtro en la referencia.

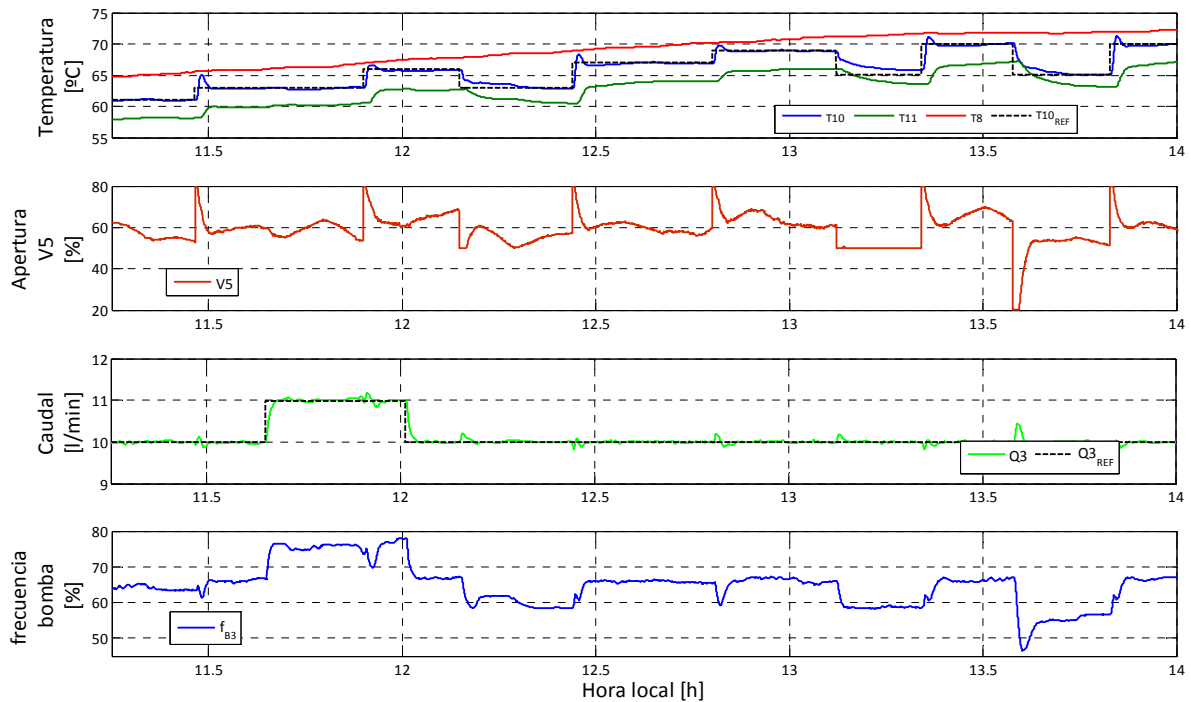


Figura 17. Intercambiador de calor del módulo MD: (1) temperaturas de referencia (T10ref), entrada (T8, T11) y salida (T10), (2) apertura de la válvula (V5), (3), caudal de la bomba (Q3) y referencia (Q3ref), (4) frecuencia de la bomba ( $f_{B3}$ )

#### 4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo ha mostrado la viabilidad del uso de control automático para conseguir unas condiciones adecuadas de temperatura a la entrada de un módulo SMD, reduciendo considerablemente los tiempos de establecimiento que se obtienen bajo control manual y haciendo un uso mucho más eficiente de la energía solar a la vez que se minimiza el uso de elementos no basados en energías renovables (aerotermino y resistencias eléctricas).

Los trabajos futuros contemplarán:

1. Mejorar el conocimiento sobre la dinámica del sistema y desarrollar modelos del sistema MD (basados en primeros principios y/o en datos experimentales).
2. Mejorar los modelos y los esquemas de control mostrados en este trabajo.
3. Implementar el lazo de control del caudal de alimentación para poder controlar la producción de destilado.
4. Extensión de los lazos de control desarrollados a los 14 modos de operación a través de un esquema de control predictivo multivariable basado en descripciones MLD (*mixed logical dynamics*).

5. Implementar una estrategia de control jerárquica que permita optimizar las consignas a los lazos de control diseñados teniendo en consideración diferentes objetivos: maximización de la producción diaria de destilado y su calidad, maximizar la eficiencia energética, minimizar costes de operación, ...)

#### Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado con el apoyo de los siguientes proyectos: Proyectos Coordinados del Plan Nacional DPI2014-56364-C2-1/2-R (ENERPRO) y DPI2014-55932-C2-1-R (PROBIOREN) financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad y fondos FEDER y Proyecto de Excelencia CONTROLCROP (P10-TEP-6174) del Gobierno Andaluz.

#### Referencias

- [1] S.B. Abdallah, N. Frikha and S. Gabsi. "Simulation of solar vacuum membrane distillation unit". *Desalination*, vol. 324, pp. 87-92, 2013.
- [2] A. Alkudhiri, N. Darwish and N. Hilal. Membrane distillation: "A comprehensive review". *Desalination*, vol. 287, pp. 2-18, 2012.

- [3] K.J. Aström, T. Hägglund. *Advanced PID control*. ISA-The Instrumentation, Systems and Automation Society, Research Triangle Park, NC 27709, 2005.
- [4] C.O. Ayala, L. Roca, J.L. Guzmán, J.E. Normey-Rico, M. Berenguel and L.J. Yebra. "Local model predictive controller in a solar desalination plant collector field". *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 3001-3012, 2011.
- [5] V.A. Bui, L.T.T. Vu and M.H. Nguyen. "Simulation and optimization of direct contact membrane distillation for energy efficiency". *Desalination*, vol. 259, pp. 29-37, 2010.
- [6] E.F. Camacho, M. Berenguel, F.R. Rubio and D. Martínez. *Control of Solar Energy Systems*, Springer, London, 2012.
- [7] L.M. Camacho, L. Dumée, J. Zhang, J. Li, M. Duke, J. Gomez and S. Gray. "Advances in membrane distillation for water desalination and purification applications". *Water*, vol. 5, pp 94-196, 2013.
- [8] H. Chang, G-B. Wang, Y-H. Chen, C-C. Li and C-L. Chang. "Modeling and optimization of a solar driven membrane distillation desalination system". *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 2714-2722, 2010.
- [9] Chang, H., Lyu S-G., Tsai C-M., Chen, Y-H., Cheng, T-W. & Chou, Y-H. (2012). "Experimental and simulation study of a solar thermal driven membrane distillation desalination process". *Desalination*, 286, 400-411.
- [10] C. Charcosset. "A review of membrane processes and renewable energies for desalination". *Desalination*, vol. 245, pp. 214-231, 2009.
- [11] E. Drioli, A. Ali, and F. Macenonio. "Membrane distillation: Recent developments and perspectives". *Desalination*, vol. 356, pp. 56-84, 2015.
- [12] M.S. El-Bourawi, Z. Ding, R. Ma, and M. Khayet. "A framework for better understanding membrane distillation separation process". *Journal of Membrane Science*, vol. 85, pp. 4-29, 2006.
- [13] F. Eleiwi and T.M. Laleg-Kirati. "Dynamic modeling and optimization in membrane distillation system". *19<sup>th</sup> World IFAC World Congress*, Cape Town, South Africa, 2014.
- [14] J.D. Gil, A. Ruiz-Aguirre, L. Roca, G. Zaragoza, M. Berenguel. Solar membrane distillation: a control perspective. 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2015), pp. 836-842, Torremolinos, Spain, 2015.
- [15] E. Guillén-Burrieza, J. Blanco, G. Zaragoza, D.C. Alarcón, P. Palenzuela, M. Ibarra and W. Gernjak. "Experimental analysis of an air gap membrane distillation solar desalination pilot system". *Journal of Membrane Science*, vol. 379, pp. 386-396, 2011.
- [16] E. Guillén-Burrieza, G. Zaragoza, S. Miralles-Cuevas, J. Blanco. "Experimental evaluation of two pilot-scale membrane distillation modules used for solar desalination". *Journal of Membrane Science*, vol. 409-410, pp. 264-275, 2012.
- [17] 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.
- [18] J.S. Ling, H. Chang and G.B. Wang. "Modelling and control of the solar powered membrane distillation system". In *AIChE annual meeting*, Minneapolis, MN, USA, 2011.
- [19] A.S. Nafey, M.A. Sharaf, L. García-Rodríguez. "A new visual library for design and simulation of solar desalination systems". *Desalination*, vol. 259, pp. 197-207, 2010.
- [20] 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.
- [21] J.R. Qtaishat and F. Banat. "Desalination by solar powered membrane distillation systems". *Desalination*, vol. 308, pp. 186-197, 2013.
- [22] L. Roca, M. Berenguel, L.J. Yebra and D.C. Alarcón-Padilla. "Solar field control for desalination plants". *Solar Energy*, vol. 82, pp. 772-786, 2008.
- [23] L. Roca, J.L. Guzmán, J.E. Normey-Rico, M. Berenguel and L.J. Yebra. "Robust constrained predictive feedback linearization controller of a collector field of a solar desalination plant". *Control Engineering Practice*, vol. 17, pp. 1076-1088, 2009.
- [24] A. Ruiz-Aguirre, D.C Alarcón-Padilla, G. Zaragoza. "Productivity analysis of two spiral-wound membrane distillation prototypes coupled with solar energy". *Desalination and Water Treatment*, in press, 2015. DOI: 10.1080/19443994.2014.946711.
- [25] R.S. Saffarini, E.K. Summers, H.A. Arafat and J.H. Lienhard. "Technical evaluation of stand-

- alone solar powered membrane distillation systems”. *Desalination*, vol. 286, pp. 332-341, 2012.
- [26] S. Skogestad. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control*, 13, 92-102, 2003.
- [27] S. Skogestad, C. Grimholt. The SimC method for smooth PID controller tuning. In R. Vilanova, A. Visioli (eds.), *PID control in the Third Millennium*, Advances in Industrial Control, Springer-Verlag London Limited, 2012.
- [28] A. Vijay, K.V. Ling and A.G. Fane. “Applications of convex optimization in plant-wide control of membrane distillation bio-reactor water recycling plant”. *11<sup>th</sup> International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*. Singapore, 2010.
- [29] P. Wang and T.S. Chung. “Recent advances in membrane distillation processes: Membrane development, configuration design and application exploring”. *Journal of Membrane Science*, vol. 474, pp. 39-56, 2015.
- [30] 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.