

## Aportaciones desde el punto de vista del control automático y la optimización a la tecnología de destilación por membranas alimentada con energía solar

Juan D. Gil<sup>a</sup>, Manuel Berenguel<sup>a,\*</sup>, Lidia Roca<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Centro Mixto CIESOL, ceiA3, Universidad de Almería.

<sup>b</sup>Centro Mixto CIESOL, CIEMAT-Plataforma Solar de Almería.

### Resumen

En este trabajo se exponen las contribuciones realizadas hasta el momento en el marco de desarrollo de la tesis doctoral del primer autor, la cual es supervisada por los demás autores. La destilación por membranas alimentada con energía solar (*Solar Membrane Distillation*, SMD) es una tecnología de desalación térmica no implantada industrialmente, adecuada para el desarrollo de pequeñas plantas autónomas capaces de cubrir requerimientos medios de demanda de agua. La tesis doctoral tiene como objetivo la aportación de contribuciones desde el punto de vista de control y optimización que supongan un avance hacia la comercialización de la tecnología de destilación por membranas. Así pues, se pretende demostrar que el control automático y los algoritmos de optimización pueden ser un factor determinante para reducir los costes económicos y mejorar la eficiencia energética de la operación, realizando algoritmos dirigidos a gestionar de forma óptima la energía solar durante la operación, y desarrollando algoritmos que permitan realizar diseños óptimos de las instalaciones ajustándose a las necesidades específicas de cada escenario.

### Palabras Clave:

Desalación, control jerárquico, control predictivo basado en modelo, optimización, energía solar.

### 1. Introducción

En las últimas décadas, la escasez de agua se está convirtiendo en uno de los principales retos que debe afrontar la humanidad. El crecimiento de la población junto con el incremento de las actividades agrícolas e industriales, han contribuido a una sobreexplotación de las reservas de agua dulce, sobrepasando el límite de renovación de dicho recurso. De este modo, las tecnologías de desalación se están convirtiendo progresivamente en un elemento necesario fundamental, especialmente en las zonas áridas o semiáridas con escasez de agua. Estas tecnologías requieren intensivos sistemas de generación de energía para su funcionamiento, por lo que deben ser asociadas con fuentes de energía renovables para su sostenibilidad económica. El uso de fuentes de energía renovables en los procesos de desalación no solo reduce los costes económicos de dichos procesos, sino que también reemplaza el uso de fuentes tradicionales como los combustibles fósiles, contribuyendo así a un desarrollo medioambiental sostenible y eficiente.

En este contexto, la Destilación por Membranas (*Membrane Distillation*, MD) con apoyo de energía solar es una tec-

nología apropiada para el desarrollo de pequeñas plantas autosuficientes de desalación, que pueden ser implantadas en zonas aisladas con unas buenas condiciones de irradiancia solar (Zaragoza et al., 2014; Cipollina et al., 2012). Esta tecnología destaca por su baja temperatura de operación, que permite que sea fácilmente acoplable a tecnologías solares. Además, tiene una serie de características que hacen que la planta pueda ser completamente automatizada, como son la sencillez del proceso, la fiabilidad y los bajos requerimientos de mantenimiento. No obstante, esta tecnología se encuentra actualmente en fase de investigación y todavía no ha sido comercializada a escala industrial, debido principalmente a problemas técnicos en el diseño del módulo, problemas de humectación en las membranas, a la baja producción de destilado y a la incertidumbre asociada a los costes económicos (Khayet, 2013). Una de las pocas plantas (ver Fig. 1) descrita totalmente en la literatura (Zaragoza et al., 2014) se encuentra en la Plataforma Solar de Almería (PSA, [www.psa.es](http://www.psa.es)).

MD es un proceso de separación impulsado térmicamente que se produce en una membrana hidrófoba y microporosa. La fuerza impulsora del proceso es el gradiente de presión que se genera a ambos lados de la membrana, como resultado de una diferencia de temperatura. De esta forma, las moléculas de agua se evaporan y pasan a través de la membrana, mientras que los componentes no volátiles son rechazados. Como todas las tec-

\* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: [juandiego.gil@ual.es](mailto:juandiego.gil@ual.es) (Juan D. Gil), [beren@ual.es](mailto:beren@ual.es) (Manuel Berenguel), [lidia.roca@ual.es](mailto:lidia.roca@ual.es) (Lidia Roca)



Figura 1: Instalación piloto de la PSA.

nologías de destilación térmica, los procesos MD tienen la capacidad de tratar agua con concentraciones de sal elevadas, pero sin necesidad de laboriosos procesos de pretratamiento químico del agua de alimentación, obteniendo permeados de alta pureza. Los sistemas MD suelen ser clasificados dependiendo del lugar donde se produzca la condensación del permeado (Alkhubiri et al., 2012). Las configuraciones más empleadas son: Destilación por Contacto Directo (*Direct Contact MD*, DCMD) y Destilación por Membranas con Espacio de Aire (*Air Gap MD*, AGMD) en los cuales el proceso de condensación se produce dentro del módulo, y Destilación por Membranas con Barrido de Gas (*Sweeping Gas MD*, SGMD), Destilación por Membrana Líquida (*Permeate Gap MD*, PGMD) y Destilación en Condiciones de Vacío (*Vacuum MD*, VMD) en los que la condensación tiene lugar en un condensador externo al módulo.

Como se ha mencionado anteriormente, en la PSA se encuentra una de las pocas instalaciones piloto MD que existen en la actualidad, en la cual se llevan a cabo investigaciones dirigidas a la caracterización y evaluación de diferentes tipos de módulos y configuraciones (Ruiz-Aguirre et al., 2017). En la planta MD de la PSA (ver Fig. 2), la energía térmica necesaria para el proceso de destilación la proporciona un campo solar formado por captadores planos dispuestos en dos filas de cinco captadores cada una. La potencia nominal del campo es de 7 kW a unos 90 °C. A la salida del campo solar hay instalado un aerotermo, que se utiliza para evitar excesos de temperatura que puedan dañar las membranas. Posteriormente, se dispone un tanque de almacenamiento térmicamente aislado (1500 L), que se emplea como buffer o almacenamiento energético y que dota a la instalación de un carácter híbrido, permitiendo la producción de destilado en varios modos de operación tal y como se presentó en (Gil et al., 2015). A continuación, se encuentra el sistema de distribución, el cual posibilita la conexión de varios módulos simultáneamente al sistema de generación de energía. Cada módulo se conecta al sistema de distribución a través de su propio intercambiador.

Dentro del módulo (ver Fig. 3), la bomba 4 impulsa la solución de alimentación (agua de mar) hacia el canal de condensación del módulo. Cuando dicha solución llega al intercambiador de calor, es calentada con el fluido proveniente del sistema de generación de energía. A continuación, la solución de alimentación caliente es dirigida hacia el canal de evaporación del módulo, de modo que las moléculas volátiles de la solución se

evaporan y pasan a través de la membrana, mientras que los componentes no volátiles se rechazan en forma de salmuera y son reconducidos al tanque de alimentación. El permeado es posteriormente condensado y vertido en el tanque de destilado. Se debe tener en cuenta que al ser una planta experimental en circuito cerrado, durante una operación, en el tanque de alimentación se va incrementando la temperatura y la salinidad de la solución inicial, debido a la recirculación de la salmuera. Para mantener las condiciones deseadas se utiliza un tanque auxiliar y un enfriador. Toda la planta está completamente monitorizada por medio de un PLC (*Programmable Logic Controller*) y un sistema de supervisión SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) con un tiempo de muestreo de 1 segundo.

En la literatura, hay muy pocos trabajos relacionados con el control y optimización de procesos MD. Desde el punto de vista del control automático casi todos los trabajos han sido realizados en simulación, y proponen estructuras de control básicas formadas por lazos individuales. En (Chang et al., 2010), se desarrolla un modelo de una planta MD y se realiza una optimización fuera de línea de su comportamiento. Posteriormente se propone un sistema de control de temperatura basado en controladores ON/OFF que intenta seguir los puntos óptimos, obtenidos por el algoritmo de optimización, durante una operación real simulada. En (Chang et al., 2012), nuevamente se emplean controladores del tipo ON/OFF para el control de la diferencia de temperatura que se produce entre el tanque y el campo solar, de modo que se desarrollan dos modos de operación: diurno y nocturno. En (Lin et al., 2011), se prueban en simulación dos bucles de control destinados a controlar la temperatura del campo solar de alimentación. En (Eleiwi et al., 2015), se desarrolla un generador de consignas que pretende mantener una diferencia de temperatura predefinida entre las dos partes de membranas. Un enfoque de control más completo es el presentado en (Karam and Laleg-Kirati, 2015), en el cual se propone un algoritmo de control óptimo en tiempo real para regular el caudal de alimentación acorde a las condiciones de operación, intentando maximizar la producción de destilado. Por último, la principal contribución de control hasta la fecha es la presentada en (Porrizzo et al., 2013), donde se desarrolla un modelo de red neuronal que se utiliza para el análisis del comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación, y que posteriormente es empleado para implementar un sistema de control que optimiza la producción de destilado en base a las condiciones de operación.

La mayoría de trabajos de optimización propuestos hasta la fecha, se centran en la búsqueda de condiciones de operación óptimas para módulos concretos (Qtaishat and Banat, 2013; Khayet and Cojocar, 2012; Ruiz-Aguirre et al., 2017). La metodología empleada en todos los trabajos suele ser la misma. En primer lugar, se elabora un modelo del módulo MD basado en datos experimentales. Posteriormente, se aplica un algoritmo de optimización que tiene como objetivo maximizar la producción o la eficiencia térmica del módulo. Las variables de decisión de los problemas de optimización planteados suele ser la temperatura de alimentación, el caudal de alimentación y la temperatura que debe proporcionar la fuente de energía. El único trabajo que propone un algoritmo de optimización destinado al diseño

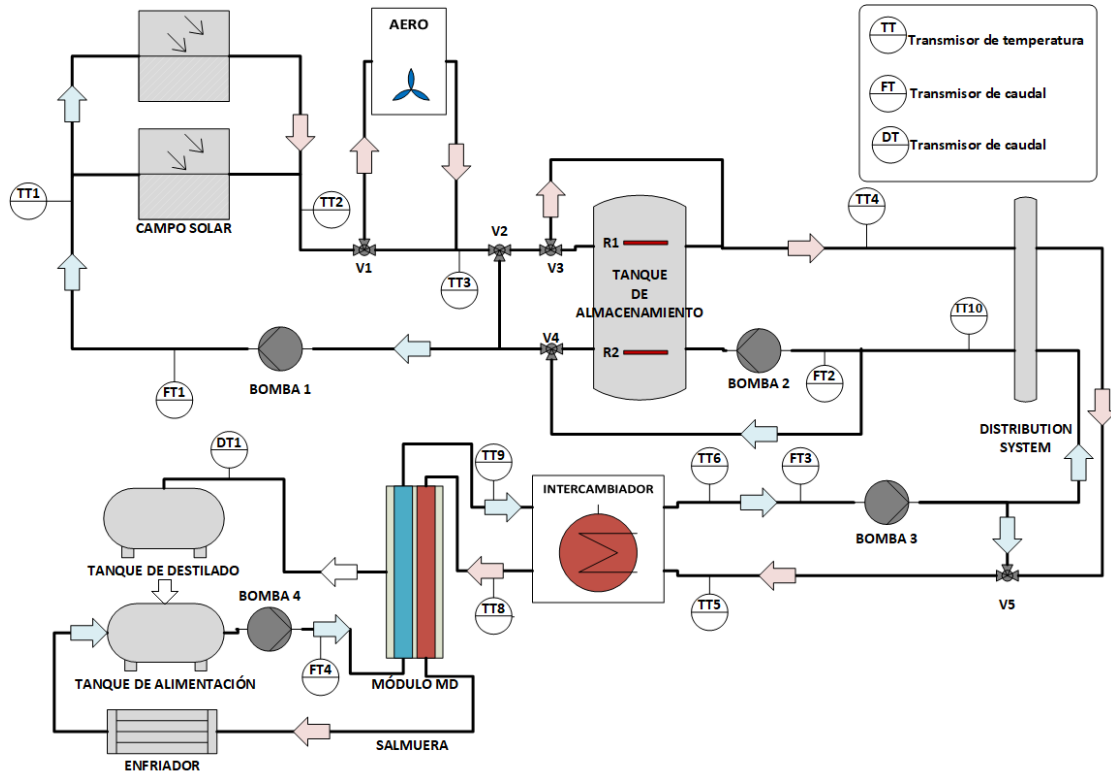


Figura 2: Diagrama esquemático de la instalación.

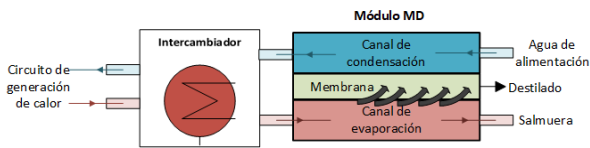


Figura 3: Diagrama esquemático del módulo MD.

óptimo de la planta es (Chen et al., 2012). En este trabajo se intenta minimizar los costes económicos anuales, planteando un problema de optimización que usa como variables de decisión el área de la membrana del módulo, el área efectiva del campo solar, el caudal de recirculación por el campo solar y el caudal de alimentación.

En la presente tesis doctoral se pretende realizar contribuciones en el campo del control jerárquico y optimización aplicadas a los sistemas MD alimentados con energía solar. De este modo, se propondrán algoritmos de control dirigidos a la gestionar de forma eficiente la energía solar, obteniendo operaciones óptimas en base a diferentes criterios (económicos, de eficiencia térmica, etc.). Del mismo modo, se desarrollarán algoritmos de optimización destinados a obtener diseños óptimos de las instalaciones, adaptándose a la demanda en diferentes escenarios. Además, es importante destacar que la investigación se está realizando en un entorno demostrativo real, lo cual puede ser un factor determinante a la hora de obtener resultados significativos que contribuyan a la comercialización de los sistemas MD.

## 2. Objetivos planteados y estado de desarrollo

Los objetivos de la presente tesis se pueden dividir en dos grandes bloques. Por un lado, el desarrollo de estrategias de control jerárquicas para la optimización en tiempo real de la operación en base a diferentes criterios (disminución de costes de operación, maximización de la eficiencia térmica etc.), y por otro, el desarrollo de algoritmos de optimización para el dimensionamiento óptimo de la planta. En las siguientes subsecciones se presentan las diferentes fases establecidas para la consecución de los objetivos así como su estado de desarrollo.

### 2.1. Modelado de la instalación

La primera fase de desarrollo ha consistido en la elaboración de un modelo completo de la instalación. La obtención de un modelo de la planta SMD es de vital importancia para el desarrollo de la tesis, ya que este modelo servirá para diseñar el algoritmo de optimización para el diseño óptimo, para probar las diferentes estrategias de control desarrolladas, y como modelo de predicción para la estructura de control jerárquica. El modelo completo de la instalación fue presentado en (Gil et al., 2018b). Para el desarrollo del modelo se utilizaron tanto modelos basados en primeros principios, previamente descritos en la literatura y con resultados satisfactorios para sistemas similares, como modelos basados en datos experimentales de la planta SMD de la PSA. A modo de ejemplo se presenta uno de los modelos basados en primeros principios usados para caracterizar la temperatura de salida del campo solar, el cual se implementó siguiendo las ideas presentadas en (Roca et al., 2009):

$$A_{sf} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial TT2(t)}{\partial t} = \beta \cdot I(t) - \frac{H}{L_{eq}} \cdot (\bar{T}(t) - T_a(t)) - c_p \cdot \dot{m}_{eq} \cdot \frac{TT2(t) - TT1(t)}{L_{eq}}, \quad (1)$$

donde:

$$L_{eq} = L_a \cdot n_{cs}, \quad (2)$$

$$\dot{m}_{eq} = \frac{FT1(t) \cdot \rho}{c_1}, \quad (3)$$

$$\bar{T}(t) = \frac{TT1(t) + TT2(t)}{2}, \quad (4)$$

$A_{sf}$  el área de la sección transversal del colector (0.007 m<sup>2</sup>),  $\rho$  es la densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>),  $c_p$  es la capacidad térmica específica del agua (J/kg°C),  $\beta$  es un parámetro que modula la irradiancia (0.11 m),  $H$  es el coeficiente global de pérdidas térmicas (5.88 J/sK),  $L_a$  es la longitud del tubo absorbedor (1.95 m),  $n_{cs}$  es el número de conexiones en serie (5), y  $c_1$  es un factor de conversión usado para tener en cuenta el número de módulos y la conversión a L/min (9.2.6.10<sup>4</sup> s·L/min·m<sup>3</sup>). Por último, TT1 y TT2 son la temperatura de entrada y salida del campo solar respectivamente (°C),  $I$  la irradiancia (W/m<sup>2</sup>) y  $T_a$  es la temperatura ambiente (°C). Del mismo modo, el tanque de almacenamiento térmico se modeló mediante un modelo dinámico no lineal estratificado en dos nodos, siguiendo las ideas presentadas en (Duffie and Beckman, 1980). Por último, el intercambiador de calor se modeló mediante un modelo estático el cual ya había sido probado en sistemas similares con buenos resultados (de la Calle et al., 2016).

Por otro lado, para el desarrollo de los modelos basados en datos experimentales, se desarrollaron campañas experimentales en la instalación de la PSA, introduciendo entradas típicas en escalón y utilizando el método de la curva de reacción para obtener modelos lineales de primer orden con retardo. En la tabla 1 se presentan los modelos obtenidos en la forma  $G(s) = Y(s)/U(s) = k \cdot e^{-t_d s} / (\tau \cdot s + 1)$ , donde  $k$  es la ganancia estática,  $\tau$  es la constante de tiempo y  $t_d$  es el tiempo de retardo.

$G(s)$	$Y(s)$	$U(s)$	$k$	$\tau$ [s]	$t_d$ [s]
$G_1(s)$	FT1(s)	$F_{p1}(s)$	0.2344	5	1
$G_2(s)$	FT2(s)	$F_{p2}(s)$	0.1674	7.65	3.01
$G_3(s)$	FT3(s)	$F_{p3}(s)$	0.1345	8.03	3
$G_4(s)$	TT2(s)	FT1(s)	-1.37	66.62	16
$G_5(s)$	TT3(s)	$F_{ac}(s)$	-0.1087	27.48	20
$G_6(s)$	TT5(s)	$F_{v5}(s)$	0.1502	14.3	10

Tabla 1: Funciones de transferencia obtenidas mediante datos experimentales.  $F_{p1}$ ,  $F_{p2}$  y  $F_{p3}$  son las frecuencias de funcionamiento de las bombas 1, 2 y 3 respectivamente,  $F_{ac}$  las frecuencia de funcionamiento del aero, y  $F_{v5}$  la frecuencia de funcionamiento de la válvula 5. El resto de variables se muestran en la Fig. 2. (Gil et al., 2018b).

## 2.2. Sistema de control directo

La segunda fase de desarrollo consistió en el diseño e implementación de un sistema de control directo capaz de mantener

la temperatura y el caudal del sistema de generación de energía en unos valores deseados. Para ello se diseñaron cuatro bucles de control haciendo uso de las funciones de transferencia presentadas en la tabla 1, los cuales se gestionan a través un generador de consignas. El diseño de los bucles de control y las pruebas en simulación y en la planta real se presentaron en (Gil et al., 2018b).

El primer bucle (ver Fig. 4) tiene como objetivo controlar la temperatura de salida del campo, usando como variable de control la bomba 1. Este bucle esta formado por un controlador en cascada, en el cual, el lazo de control esclavo se encarga de mantener el caudal (FT1 en la Fig. 2) deseado, mientras que el lazo de control maestro calcula el caudal (FT1 en la Fig. 2) requerido para alcanzar la temperatura deseada a la salida del campo. Además, este bucle de control se complementa con un controlador por adelanto (FF, *feedforward*) en configuración paralela que tiene implementado el modelo en estático del campo solar (Eq. 1), de forma que se obtiene el caudal nominal de operación en base a las condiciones de operación (TT1,  $I$ ,  $T_a$ ) en cada instante. El segundo bucle de control actúa sobre el bloque de enfriamiento (aerotermino), con el fin de controlar TT3 (ver Fig. 2). El bucle 3 actúa sobre V5 con el fin de controlar la temperatura de entrada al intercambiador de calor (TT5 en la Fig. 2). Además, al igual que en el caso del bucle de control 1, se utiliza un FF en configuración paralela, en cual hace uso del modelo de la mezcla producida en V5 para calcular la apertura nominal de V5 en función de las condiciones de operación (TT5, TT6 y TT10). Por último, los bucles de control 4 y 5, tienen como objetivo mantener los caudales a la entrada del intercambiador y en el tanque de almacenamiento, actuando sobre la bomba 3 y la 2 respectivamente (ver Fig. 4).

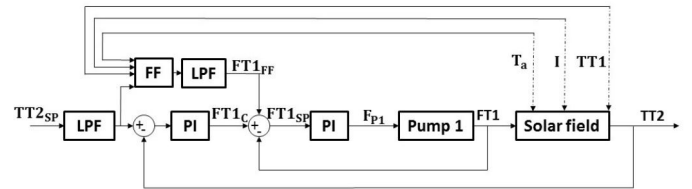


Figura 4: Esquema de control del bucle 1 (Gil et al., 2018b). LPF es un filtro paso bajo, PI son controladores tipo PI, *pump 1* es la bomba 1, *solar field* es el campo solar, y FT1<sub>FF</sub>, FT1<sub>C</sub> y FT1<sub>SP</sub> son la señal de control del FF y del controlador tipo PI y la consigna de caudal respectivamente. (Gil et al., 2018b)

Como se ha mencionado anteriormente, los bucles de control se gestionan a través de un generador de consignas, el cual calcula las referencias para los bucles de control de temperatura (bucle 1, 2 y 3) en función de la temperatura deseada a la entrada del módulo MD (TT8 en la Fig. 4) y las condiciones de operación, haciendo uso del modelo estático del intercambiador de calor.

## 2.3. Estructura de control jerárquica

La tercera fase de desarrollo consistió en el diseño e implementación de una estructura de control jerárquica (ver Fig. 5) formada por dos capas, la cual tiene como objetivo optimizar en tiempo real la operación de la planta en términos de

eficiencia térmica, producción de destilado y costes de operación. En la capa superior de la estructura de control jerárquica (PNMPC controller en la Fig. 5) se usa una aproximación práctica del esquema de control predictivo no lineal basado en modelo (PNMPC, *Practical Nonlinear Model Predictive Control*) (Plucenio et al., 2007) que permite obtener la operación óptima de la instalación en tiempo real de acuerdo a los objetivos mencionados anteriormente, mediante la gestión óptima del uso de la energía solar. Por otro lado, la capa inferior del sistema de control jerárquico (*Direct control system* en la Fig. 5) está formado por los bucles de control directo mencionados en el apartado anterior, los cuales tienen como objetivo alcanzar las referencias calculadas por la capa superior. Todo el sistema de control se complementó con un algoritmo para predecir la radiación (*Disturbance prediction* en la Fig. 5) siguiendo las ideas presentadas en (Pawlowski et al., 2011). Además, se implementaron dos modos de control, uno dedicado a incrementar la temperatura del tanque de almacenamiento térmico, y otro dedicado a la operación del módulo MD, los cuales se conmutaban a través de un sistema de decisión (*Decision maker* en la Fig. 5) en base a las condiciones de operación. El diseño, las pruebas en simulación, y las pruebas en la planta real fueron presentadas en (Gil et al., 2017, 2018a). Cabe destacar que mediante el uso de la técnica PNMPC se logra disminuir los costes de operación entorno a un 8 %, y aumentar la eficiencia térmica entorno a un 2 % en comparación con una operación manual (Gil et al., 2018a).

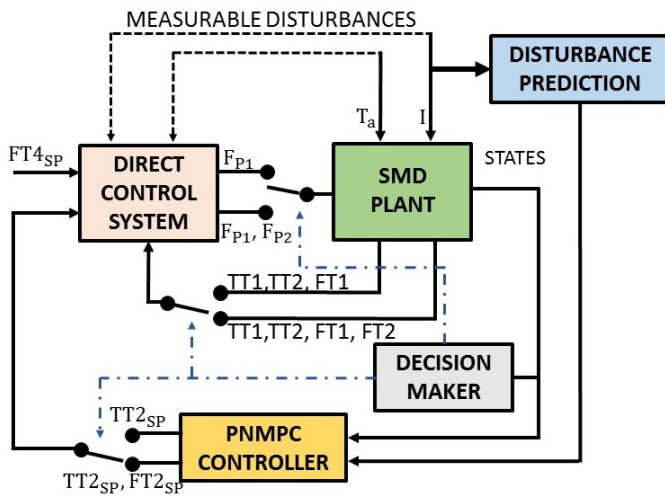


Figura 5: Diagrama esquemático del sistema de control jerárquico. (Gil et al., 2018a).

#### 2.4. Algoritmo para el dimensionamiento óptimo de la instalación

La cuarta y última fase de desarrollo consiste en la realización de un algoritmo para el dimensionamiento óptimo de una instalación SMD. El dimensionamiento óptimo de una instalación es uno de los mayores problemas a afrontar en la puesta a punto de una planta industrial, ya que una inversión inicial muy elevada puede suponer el fracaso de dicha instalación. De

este modo, para la correcta implantación industrial de la tecnología MD, se necesitan algoritmos de optimización que hagan un dimensionamiento óptimo de la planta, de acuerdo a la demanda de agua que requiere el escenario donde será implantada la instalación. En el desarrollo de la presente tesis se pretenden mejorar los resultados presentados en (Chen et al., 2012) haciendo uso del sistema de control jerárquico presentado en la sección anterior, y acometiendo el diseño de instalaciones que puedan hacer frente a demandas de agua variables, en base a la estación del año o a las diferentes horas del día, como pueden ser invernaderos o edificios de oficinas. El problema de optimización puede ser descrito a grandes rasgos como:

$$\min_{x \in S} f(x), \quad (5)$$

$$c(x) \leq d, \quad (6)$$

$$P(x) \geq D, \quad (7)$$

donde  $x$  es un vector que contiene las variables de decisión del problema de optimización, las cuales serán modificadas durante el proceso de optimización. Todas las variables posibles forman el conjunto de decisión  $S$ ,  $c$  es un vector que contiene restricciones del problema dependientes de las variables de decisión,  $d$  es un vector que contiene los valores de las restricciones de  $c$ ,  $P$  es la producción de la planta y  $D$  es la demanda de agua requerida por el escenario planteado.

### 3. Conclusiones

En la presente tesis doctoral se pretende realizar contribuciones en el campo del control jerárquico y optimización aplicadas a los sistemas MD alimentados con energía solar, con el fin de ayudar al desarrollo comercial de dicha tecnología. Hasta el momento se han realizado contribuciones destinadas a optimizar la operación de la instalación en tiempo real, con objetivos como maximizar la producción de destilado y la eficiencia térmica, y minimizar los costes de operación. Los resultados obtenidos muestran como las técnicas de control desarrolladas pueden mejorar significativamente la operación diaria de la instalación (Gil et al., 2018b, 2017, 2018a).

En trabajos futuros se seguirán desarrollando técnicas de control para mejorar la operación de la planta en base a métricas diferentes. Además, se desarrollarán nuevos modelos del módulo MD los cuales tengan en cuenta su operación a altas salinidades. Por otra parte, se abordará el desarrollo de algoritmos de optimización para el diseño óptimo de las instalaciones 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

- Alkhudhiri, A., Darwish, N., Hilal, N., 2012. Membrane distillation: a comprehensive review. *Desalination* 287, 2–18.
- 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.
- Chang, H., Wang, G.-B., Chen, Y.-H., Li, C.-C., Chang, C.-L., 2010. Modeling and optimization of a solar driven membrane distillation desalination system. *Renewable Energy* 35 (12), 2714–2722.
- Chen, Y.-H., Li, Y.-W., Chang, H., 2012. Optimal design and control of solar driven air gap membrane distillation desalination systems. *Applied Energy* 100, 193–204.
- Cipollina, A., Di Sparti, M., Tamburini, A., Micale, G., 2012. Development of a membrane distillation module for solar energy seawater desalination. *Chemical Engineering Research and Design* 90 (12), 2101–2121.
- de la Calle, A., Roca, L., Bonilla, J., Palenzuela, P., 2016. Dynamic modeling and simulation of a double-effect absorption heat pump. *International Journal of Refrigeration* 72, 171–191.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 1980. *Solar engineering of thermal processes*.
- Eleiwi, F., N'Doye, I., Laleg-Kirati, T.-M., 2015. Feedback control for distributed heat transfer mechanisms in direct-contact membrane distillation system. In: 2015 IEEE Conference on Control Applications (CCA). Sydney, Australia, pp. 1624–1629.
- Gil, J. D., Roca, L., Ruiz-Aguirre, A., Zaragoza, G., Berenguel, M., 2018a. Optimal operation of a solar membrane distillation pilot plant via nonlinear model predictive control. *Computers & Chemical Engineering* 109, 151–165.
- Gil, J. D., Roca, L., Ruiz-Aguirre, A., Zaragoza, G., Guzmán, J. L., Berenguel, M., 2017. 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). Valletta, Malta.
- Gil, J. D., Roca, L., Zaragoza, G., Berenguel, M., 2018b. A feedback control system with reference governor for a solar membrane distillation pilot facility. *Renewable Energy* 120, 536–549.
- Gil, J. D., Ruiz-Aguirre, A., Roca, L., Zaragoza, G., Berenguel, M., 2015. Solar membrane distillation: A control perspective. In: 23th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2015). Torremolinos, Málaga, Spain, pp. 796–802.
- Karam, A. M., Laleg-Kirati, T. M., 2015. Real time optimization of solar powered direct contact membrane distillation based on multivariable extremum seeking. In: Control Applications (CCA), 2015 IEEE Conference on. IEEE, pp. 1618–1623.
- Khayet, M., 2013. Solar desalination by membrane distillation: Dispersion in energy consumption analysis and water production costs (a review). *Desalination* 308, 89–101.
- Khayet, M., Cojocar, C., 2012. Air gap membrane distillation: Desalination, modeling and optimization. *Desalination* 287, 138–145.
- Lin, J.-S., Chang, H., Wang, G. B., 2011. Modelling and control of the solar powered membrane distillation system. In: AIChE Annual Meeting. Minneapolis, MN, USA.
- Pawlowski, A., Guzmán, J. L., Rodríguez, F., Berenguel, M., Normey-Rico, J. E., 2011. Predictive control with disturbance forecasting for greenhouse diurnal temperature control. *IFAC Proceedings Volumes* 44 (1), 1779–1784.
- Plucenio, A., Pagano, D., Bruciapaglia, A., Normey-Rico, J., 2007. A practical approach to predictive control for nonlinear processes. *IFAC Proceedings Volumes* 40 (12), 210–215.
- Porrizzo, R., Cipollina, A., Galluzzo, M., Micale, G., 2013. A neural network-based optimizing control system for a seawater-desalination solar-powered membrane distillation unit. *Computers & Chemical Engineering* 54, 79–96.
- Qtaishat, M. R., Banat, F., 2013. Desalination by solar powered membrane distillation systems. *Desalination* 308, 186–197.
- Roca, L., Guzman, J. L., Normey-Rico, J. E., Berenguel, M., Yebra, L. J., 2009. Robust constrained predictive feedback linearization controller in a solar desalination plant collector field. *Control Engineering Practice* 17 (9), 1076–1088.
- Ruiz-Aguirre, A., Andres-Manas, J., Fernández-Sevilla, J., Zaragoza, G., 2017. Modeling and optimization of a commercial permeate gap spiral wound membrane distillation module for seawater desalination. *Desalination* 419, 160–168.
- Zaragoza, G., Ruiz-Aguirre, A., Guillén-Burrieza, E., 2014. Efficiency in the use of solar thermal energy of small membrane desalination systems for decentralized water production. *Applied Energy* 130, 491–499.