

CONTROL DE PLANTAS DE DESTILACIÓN POR MEMBRANAS CON APOYO DE ENERGÍA SOLAR – PARTE 1: ESQUEMAS

Juan D. Gil¹, Alba Ruiz-Aguirre², Lidia Roca², Guillermo Zaragoza², Manuel Berenguel¹, José Luis Guzmán¹

¹Universidad de Almería, Centro Mixto CIESOL, ceiA3 (jgv132@inlumine.ual.es ; beren@ual.es ;
joseluis.guzman@ual.es)

²CIEMAT-Plataforma Solar de Almería, Centro Mixto CIESOL (alba.ruiz@psa.es, lidia.roca@psa.es,
guillermo.zaragoza@psa.es)

Resumen

La destilación por membranas es una tecnología de desalación de agua no implantada industrialmente y en la que existen numerosas incógnitas sobre su funcionamiento y producción 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 actuales está ubicada en la Plataforma Solar de Almería (PSA). En este trabajo se incluye una descripción sobre la instalación y los esquemas de control que se han propuesto para conseguir unas condiciones adecuadas de flujo másico y temperatura a la entrada del sistema de destilación. En la segunda parte se expondrán resultados representativos.

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

1 INTRODUCCIÓN

La destilación por membranas con apoyo de energía solar (SMD, *Solar Membrane Distillation*) es una tecnología que se encuentra actualmente en proceso de investigación para cubrir requerimientos moderados de agua en zonas con buenas condiciones de radiación solar. La coincidencia entre la escasez de agua y la disponibilidad de radiación solar hace que la energía solar sea la opción más adecuada para mitigar el déficit de agua [2, 7, 10, 11, 20, 30]. Las principales ventajas de esta tecnología son [14, 15]: i) baja temperatura de operación (60-90 °C), ii) bajos requisitos de mantenimiento y iii) puede ser fácilmente acoplada a tecnologías solares bien establecidas. Sin embargo, la tecnología SMD no se ha aplicado a nivel industrial, debido fundamentalmente a dificultades en el diseño de la membrana, humectación de sus poros, el control del flujo másico y la incertidumbre asociada a sus costes energéticos y económicos [12, 16]. MD es un proceso de separación impulsado térmicamente [2] producido en una membrana porosa hidrofóbica. Debido al establecimiento de una diferencia de

presión de vapor entre los dos lados de la membrana, se induce un flujo de moléculas de vapor, mientras que los componentes no volátiles son rechazados. Las investigaciones recientes sobre las tecnologías SMD se centran en la evaluación, por medio de campañas experimentales, de diferentes tipos de diseños y configuraciones [14, 15, 24, 29]. Los parámetros más relevantes que se estudian para evaluar el rendimiento de módulos MD son la producción de destilado, el consumo específico de energía térmica y la eficiencia térmica. Para llegar a conclusiones relevantes a través de estos estudios, se deben mantener en estado estacionario o cuasi-estacionario las variables principales que intervienen en el proceso (temperaturas del agua procedente de la fuente fría y caliente y los flujos másicos asociados). Sin embargo, debido a la variabilidad de la radiación en su ciclo solar o debido al paso de nubes, es complicado controlar dichas variables incluso disponiendo de operadores cualificados. Este hecho puede dar lugar a la extensión temporal indeseable de las campañas experimentales o a la necesidad de utilizar fuentes de energía no renovables para cubrir los requisitos de la operación.

Hay muy pocos trabajos relacionados con el modelado dinámico y control de procesos SMD. En [12] se incluye una visión general de enfoques de modelado, junto a una descripción de las variables de operación que afectan al proceso MD y los pasos que hay que llevar a cabo para controlar el sistema en diferentes configuraciones. En [13] se presenta una propuesta de modelado dinámico y optimización en sistemas MD, donde se introduce un modelo dinámico basado en una ecuación de advección-difusión 2D. En [18] se desarrolla una biblioteca visual en entorno Matlab para el diseño y simulación de distintos tipos de sistemas de desalinización solar. En [1] se desarrolla un modelo matemático que permite simular una unidad de destilación por membranas de vacío, con la finalidad de determinar su productividad diaria. En [8, 9] se presenta un modelo dinámico de simulación de un sistema SMD usando *Aspen Custom Modeler* basado en balances de transferencia de masa y energía. A través de este modelo se estudian los efectos que sobre el

comportamiento de la planta provoca la adopción de distintas funciones objetivo, cambios en la radiación solar, configuraciones de tanques de almacenamiento y el efecto de modificar el caudal en el módulo MD y en los tanques de almacenamiento. En [5] se implementa un problema de optimización con un doble lazo para resolver las ecuaciones fuertemente no-lineales en las que se desconocen las condiciones de salida y de la membrana y se minimiza el consumo de energía. En [25] se utiliza optimización convexa para llevar a cabo la optimización de consignas dentro de una estrategia de control jerárquico aplicada a biorreactores MD.

El primer trabajo en que se adoptó una estrategia de control similar a la tratada en este artículo fue [17], donde se desarrolló un modelo simplificado de un sistema MD y se implementaron dos lazos de control de temperatura en simulación. En [8, 9] se desarrolló un sistema de control de temperatura en sistemas MD usando controladores PI y todo/nada. La principal estrategia de control se presentó en [20], donde se presentó un sistema de control de la producción de destilado en una planta SMD similar a la tratada en este trabajo usando un modelo neuronal del sistema. Ese modelo neuronal se utilizó para el análisis del comportamiento del sistema (producción de destilado) bajo distintas condiciones de operación (caudal de alimentación, radiación solar y temperatura de alimentación). El esquema de control desarrollado incorporaba controladores por adelantado (FF, *feedforward*) siguiendo las ideas de [4, 6, 21, 22, 23].

Este trabajo se centra en el estudio e implementación de una arquitectura básica de control de la temperatura de entrada a un módulo MD ubicado en la Plataforma Solar de Almería (PSA, www.psa.es), que incluye el control de la temperatura del campo solar, de un bloque de enfriamiento (aerotermino) y de un sistema de mezcla a la entrada de la unidad MD, tratando de mejorar la operación de la planta y reducir el uso de energía no procedente de fuentes renovables. En futuros trabajos se abordará el control de la producción a través de la manipulación del caudal de alimentación a dicho módulo. En [14] se establecieron 14 modos de operación del sistema y se mostraron ensayos en modo manual, junto a una explicación del procedimiento habitual de control en este tipo de instalación. Basándose en ese trabajo preliminar y centrándose en los modos más utilizados (modo directo y modo directo con aerotermino), en estos artículos (partes 1 y 2) se describe en el apartado 2 la planta y los bucles de control definidos, en la sección 3 se comentan aspectos de implementación tanto en simulación como en el sistema real, incluyendo los modelos obtenidos y en la sección 4 se establecen las conclusiones y trabajos futuros pendientes.

2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La planta piloto MD se muestra en la figura 1 y su diagrama esquemático en la figura 2. Como se puede apreciar, se trata de un módulo MD conectado a un campo solar con captadores planos a través de un intercambiador de calor y un sistema de distribución de flujo que permite la conexión de varias unidades de destilación MD. Como se ha indicado, MD es un proceso de separación impulsado térmicamente basado en el transporte de moléculas de vapor a través de una membrana micro-porosa hidrófoba. Las fuerzas de tensión superficial de la membrana hidrófoba impiden a las moléculas de líquido a entrar en los poros, mientras que el vapor pasa a través de ellos debido a la diferencia en la presión de vapor a ambos lados de la membrana, que puede ser establecida por una diferencia de temperatura (fuerza motriz). Los materiales de los módulos, principalmente la membrana, imponen una limitación en la temperatura máxima alcanzable en el interior del módulo (alrededor de 80 °C). Por otro lado, temperaturas inferiores a 60 °C dan lugar a una producción muy baja. Por ese motivo, las restricciones en las temperaturas de trabajo en el módulo MD van entre 60 °C y 80 °C (T15 en figura 2). El caudal de alimentación al módulo puede variar de 400 l/h a 600 l/h (Q10 en figura 2).



Figura 1. Fotografía de la planta MD en PSA

La energía térmica necesaria para alcanzar un gradiente de temperatura dentro del módulo MD la proporciona el campo de captadores planos (Solaris CP1 Nova by Solaris, España), formados por cinco colectores. Cada colector Solaris CP1 tiene una dimensión de 2082 x 1082 x 85 mm. La superficie del absorbedor es de 2 m² y está fabricado con aluminio incorporando un recubrimiento selectivo de alta eficiencia con *mirotherm*. La cara expuesta es un vidrio templado de espesor 3.2 mm con bajo contenido de hierro, mientras que los otros lados están aislados térmicamente con lana mineral de 25 mm de espesor. La potencia térmica nominal de este campo solar es de 7 kWth para una temperatura de 90 °C aproximadamente, utilizando agua desmineralizada como fluido térmico con anticongelante (GEO 100 FLUID, Saleplas) en una proporción de 22:100 (GEO FLUID: agua).

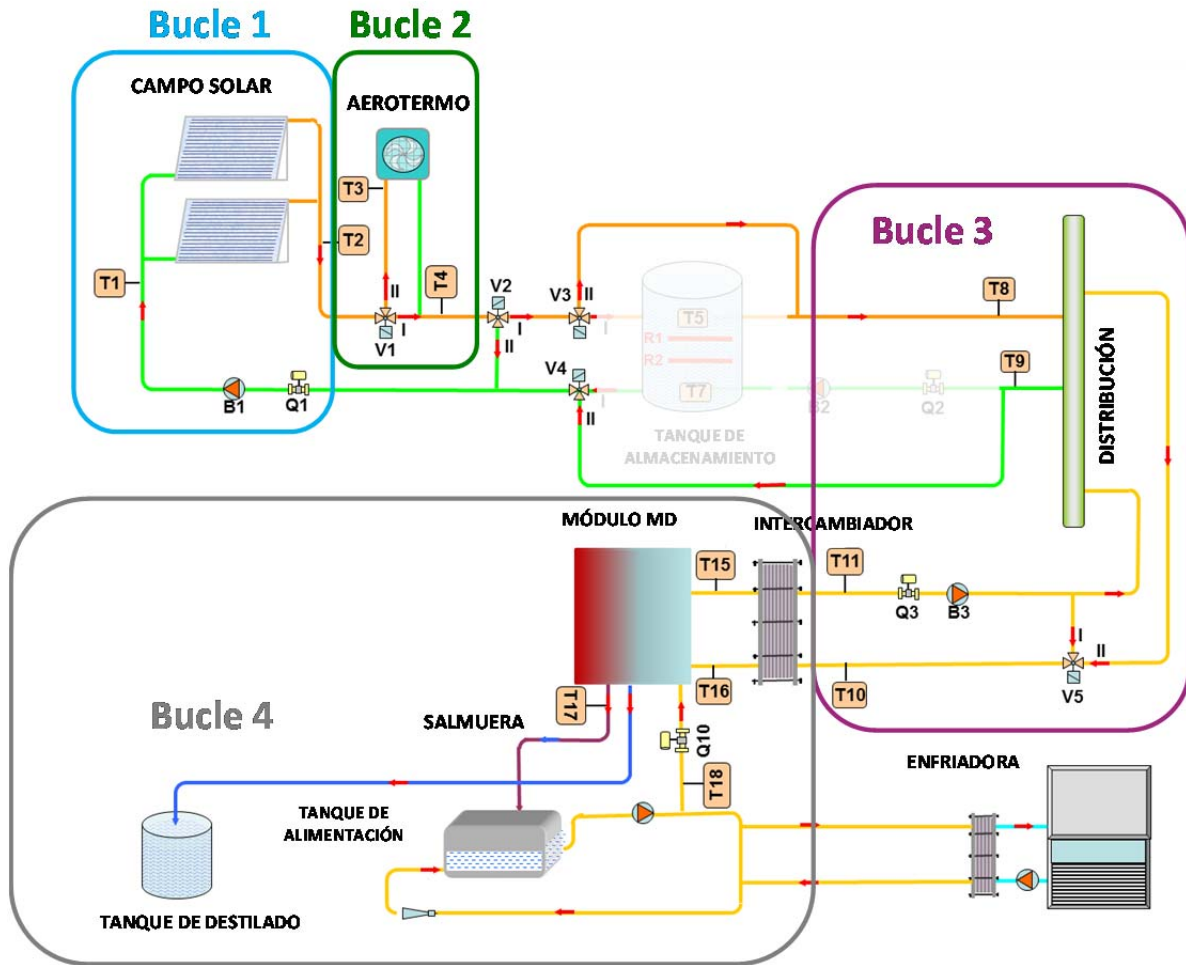


Figura 2: Diagrama esquemático de la instalación con los lazos de control

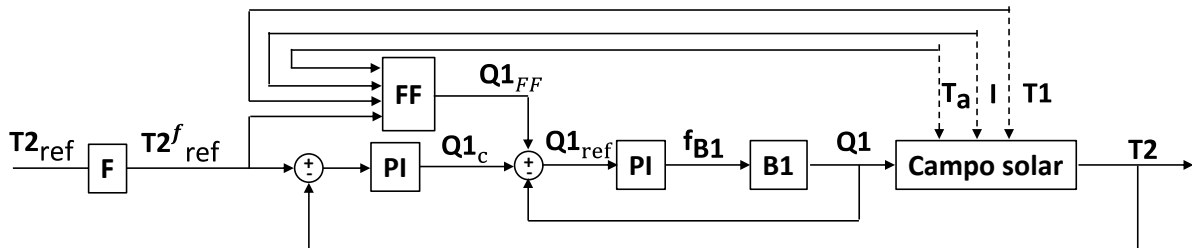


Figura 3: Esquema de control del bucle 1 - temperatura de salida del campo solar

El lazo solar tiene un tanque de almacenamiento térmico (1500 l) que se puede utilizar para trabajar en condiciones estables o cuando las condiciones meteorológicas no son favorables. Este tanque incluye dos resistencias eléctricas que se pueden usar para dar apoyo energético cuando la potencia térmica suministrada por el campo solar no es suficiente para alcanzar las condiciones de funcionamiento deseadas en el módulo MD. Dicho tanque aparece difuminado en la figura 2 porque no se utiliza en los esquemas de control tratados en este artículo, con la finalidad de evitar el uso de las resistencias eléctricas para

minimizar el coste de operación. Cuando el depósito está frío, el módulo MD se acopla directamente con el campo solar, cuya temperatura se controla manipulando el flujo másico de fluido usando la bomba B1 (figura 2). Por otra parte, la salida de campo está equipada con un aerotermo para controlar el exceso de temperatura. La instrumentación utilizada consta de una bomba centrífuga de acero inoxidable (Wilo-Stratos 25/1-6 CAN PN 10), medidores de flujo electromagnéticos (Promag 50P15 de Endress + Hauser), accionamiento rotativo con tecnología universal de Sauter para válvulas de bola

(AKM 115S), transmisores de presión (se emplearon S10 absolutos de WIKA) y termómetros de resistencia con cabezal estándar IP67 equipados con vaina. Para medir la radiación solar global en ángulo inclinado (35°) se utiliza un piranómetro (CM6B por Kipp + Zonen). Se ha desarrollado un sistema SCADA basado en LabVIEW que registra todas las variables medidas y permite controlar los actuadores a través de un PLC.

3 BUCLES DE CONTROL

En este trabajo se han diseñado, implementado y ensayado los bucles de control 1, 2 y 3 mostrados en la figura 2. Como se ha indicado en la introducción, en [14] se establecieron 14 modos de operación del sistema (definidos por el estado de las válvulas, bombas, resistencias de calentamiento y aerotermo) y se mostraron ensayos en modo manual donde se explica el procedimiento habitual de control de este tipo de instalación, que hace uso extensivo del aerotermo, lo que no es muy eficiente desde el punto de vista energético.

En este apartado se trabaja con los denominados Modo 9 (la energía térmica que llega al módulo MD procede directamente del campo solar) y el Modo 13, donde el sistema se configura en Modo 9 pero también se activa el aerotermo para reducir la temperatura a la entrada del módulo MD cuando el caudal en el campo solar satura al máximo (el variador de la bomba está saturado), pudiendo existir fluctuaciones de caudal debidos a cambios de modo durante la operación.

3.1 Bucle 1: Control de la temperatura de salida del campo solar

Se ha implementado un esquema de control en cascada con dos controladores PI: un esclavo para el control del caudal de impulsión de la bomba B1 actuando sobre el variador de frecuencia de la bomba (f_{B1}) y el maestro que proporciona el caudal demandado a la bomba para conseguir una temperatura de salida deseada del campo solar ($T2_{ref}$). El sistema está sometido a fuertes perturbaciones procedentes de la irradiancia solar (I , principal fuente de energía), temperatura de entrada del agua al campo solar ($T1$) y temperatura ambiente (T_a). Para tener en cuenta estas perturbaciones, se ha implementado un esquema de control por adelanto (FF, *feedforward*) típico cuando se trabaja con captadores solares [6]. Ese controlador (FF en la figura 3) se obtiene a partir de un balance de energía en estado estacionario y proporciona el caudal nominal de operación ($Q1_{FF}$) en función de las condiciones de operación. Se obtiene suponiendo que la temperatura de salida del campo solar ($T2$) se puede modelar considerando el comportamiento de

un tubo absorbedor equivalente con el mismo comportamiento que el campo solar [23]. También se puede implementar en forma dinámica a través de técnicas de linealización por realimentación como se muestra en [23]. La nomenclatura asociada se incluye en la Tabla 1. La ecuación de balance energético que define un modelo simplificado de parámetros concentrados del sistema viene dada por:

$$\rho C_p A \frac{dT2(t)}{dt} = \beta I(t) - \frac{H}{L_{eq}} (\tilde{T}(t) - T_a(t)) - C_p \frac{\rho}{c_f} Q1_{FF}(t) \frac{(T2(t) - T1(t))}{L_{eq}} \quad (1)$$

Los parámetros del modelo representado en la ecuación (1) fueron identificados en base a ensayos reales, proporcionando un modelo que representa de forma aproximada la dinámica del campo de captadores solares, como se puede comprobar en la figura 4 en la que se han utilizado datos de ensayos en bucle abierto en la instalación bajo condiciones ambientales reales (no se representan las entradas y las perturbaciones porque en este caso no aportan información de interés).

Considerando el estado estacionario y haciendo $T2 = T2_{ref}$ en (1) se obtiene:

$$Q1_{FF}(t) = \left[\frac{\beta \cdot L_{eq}}{C_p \cdot (T2_{ref}^f(t) - T1(t))} \cdot I(t) - \frac{H}{C_p} \cdot \frac{(\tilde{T}(t) - T_a(t))}{(T2_{ref}^f(t) - T1(t))} \right] \cdot \frac{c_f}{\rho}$$

$$\text{donde } L_{eq} = L_a \cdot n_{cs} \text{ y } \tilde{T}(t) = \frac{T2(t) + T1(t)}{2} \quad (2)$$

En el esquema de control se ha incluido un filtro en la referencia para desacoplar el problema de seguimiento de referencias del de rechazo de perturbaciones y disminuir la sobreoscilación frente a cambios de consigna de tipo escalón. Como se analizará en el apartado de resultados en la parte 2 del trabajo, los controladores PI maestro y esclavo se han diseñado considerando que las variaciones en la dinámica de la bomba y del campo solar se pueden aproximar por funciones de transferencia de primer orden con retardo (FTPOR), obtenidas a partir de ensayos en escalón en bucle abierto (con el controlador FF en funcionamiento) en distintos puntos de operación (constituyendo modelos de pequeñas perturbaciones en torno a dichos puntos de operación). La figura 5 muestra ejemplos de las salidas que proporcionan los modelos de desviación identificados para el caudal de la bomba (realizando cambios en la velocidad del variador del 30% entre el mínimo y el máximo) en distintas condiciones de operación y para el campo solar con una variación de 3 l/min en torno al mediodía solar de un día claro con radiación global cercana a 900 W/m². El esquema de control completo se muestra en la figura 3.

Tabla 1. Nomenclatura

Var	Descripción	Uds	
c_f	Factor de conversión para tener en cuenta el número de módulos, las conexiones y la conversión l/min	$9 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 10^4$	
C_p	Capacidad térmica específica	4190 J/kg/°C	
f	Frecuencia del variador	%	
H	Coefficiente global de pérdidas térmicas	4.7 J/s/K	
I	Irradiancia global	W/m ²	
n_{cs}	Número de conexiones en serie	5	
L_a	Longitud del tubo absorbedor	1.95 m	
L_{eq}	Longitud del tubo absorbedor equivalente	$1.95 \cdot 5$ m	
$Q1$	Caudal de agua en el campo solar	l/min	
$Q2$	Caudal en el tanque y sistema de distribución	l/min	
$Q3$	Caudal en el intercambiador de calor del módulo MD	l/min	
T_a	Temperatura ambiente	°C	
$T1$	Temperatura de entrada al campo solar	°C	
$T2$	Temperatura de salida del campo solar	°C	
$T4$	Temperatura de la mezcla de agua entre la salida del aerotermino y el campo solar	°C	
$T8$	Temperatura de entrada al sistema de distribución	°C	
$T10$	Temperatura de entrada al intercambiador de calor	°C	
$T11$	Temperatura de salida del intercambiador de calor	°C	
$T11$	Temperatura de salida del intercambiador de calor	°C	
\bar{T}	Temperatura media del campo solar	°C	
V_i	Apertura de la válvula i	%	
β	Parámetro que modula la irradiancia	0.123 m	
ρ	Densidad del agua	975 kg/m ³	
Subín	Descripción	Subín	Descripción
ac	Aerotermino	B3	Bomba del intercambiador MD
B1	Bomba del campo solar	C	Control realimentado
B2	Bomba del tanque y sistema de distribución	FF	Control anticipativo (Feedforward)
ref	Referencia		

3.2 Bucle 2: Temperatura de mezcla aerotermino-campo solar

El objetivo de este esquema de control (mostrado en la figura 6) es alcanzar una temperatura deseada $T4$ cuando $T2$ tiene una temperatura superior debido a saturación del caudal de la bomba B1 o a oscilaciones causadas por perturbaciones que no puede compensar completamente el bucle 1. Desde un punto de vista de eficiencia energética, es menos costoso manipular la apertura de la válvula $V1$ que el variador de frecuencia del aerotermino (f_{ac}). Desde el punto de vista del control automático sin embargo, es más complejo el control usando la válvula debido a sus características. Como se trata de un sistema con dos entradas ($V1$ y f_{ac}), una salida ($T4$) y dos perturbaciones ($Q1$ y $T2$), se decidió evitar la manipulación simultánea de los dos actuadores, de forma que para minimizar el coste energético se actúa sobre la válvula (saturando el aerotermino a su mínimo) y cuando la válvula satura a su apertura máxima se controla la frecuencia del aerotermino.

Se realizaron ensayos de escalón en bucle abierto en los dos actuadores y con variaciones en el caudal de la bomba B1, dado que dicho caudal puede experimentar oscilaciones (aun estando saturado el variador de frecuencia de la bomba) debido a la recirculación del fluido por el sistema de distribución

y/o el tanque (cambio en la configuración del sistema hidráulico). La figura 7 muestra un ejemplo de dichos ensayos en bucle abierto, que sirven para caracterizar la dinámica asociada a variaciones en cada una de las entradas. Como se expone en la sección de resultados en la parte 2 de este trabajo, se pudo comprobar que la dinámica que relaciona la apertura de la válvula con la temperatura $T4$ (estando el aerotermino en su velocidad mínima) puede ser caracterizada como un sistema de tercer orden con un cero de fase mínima dominante y con un tiempo de retardo normalizado superior a 1, mientras que la dinámica asociada a la variación en la velocidad del aerotermino con la válvula saturada a su valor máximo corresponde con un sistema de primer orden con retardo normalizado en torno a 1.

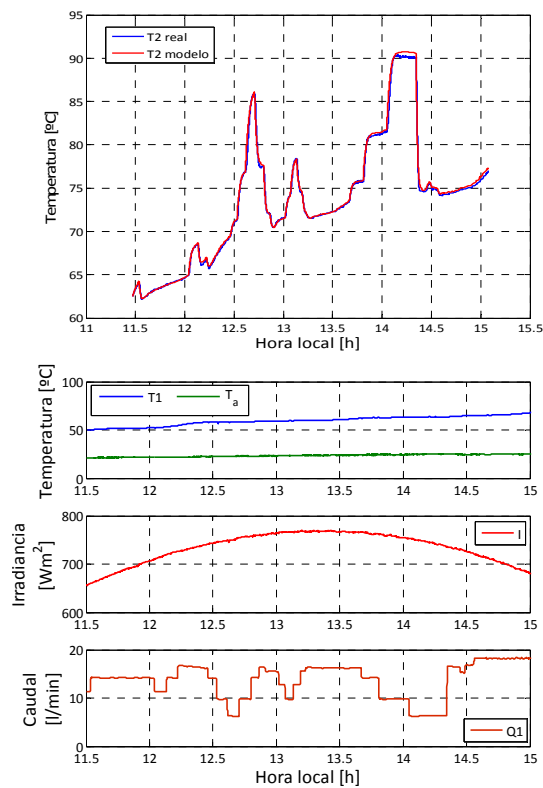
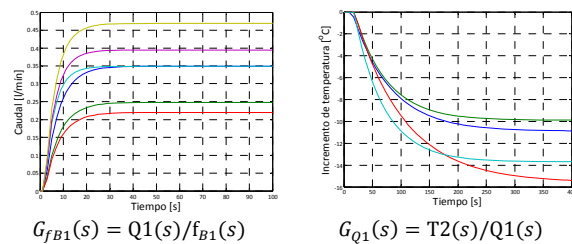


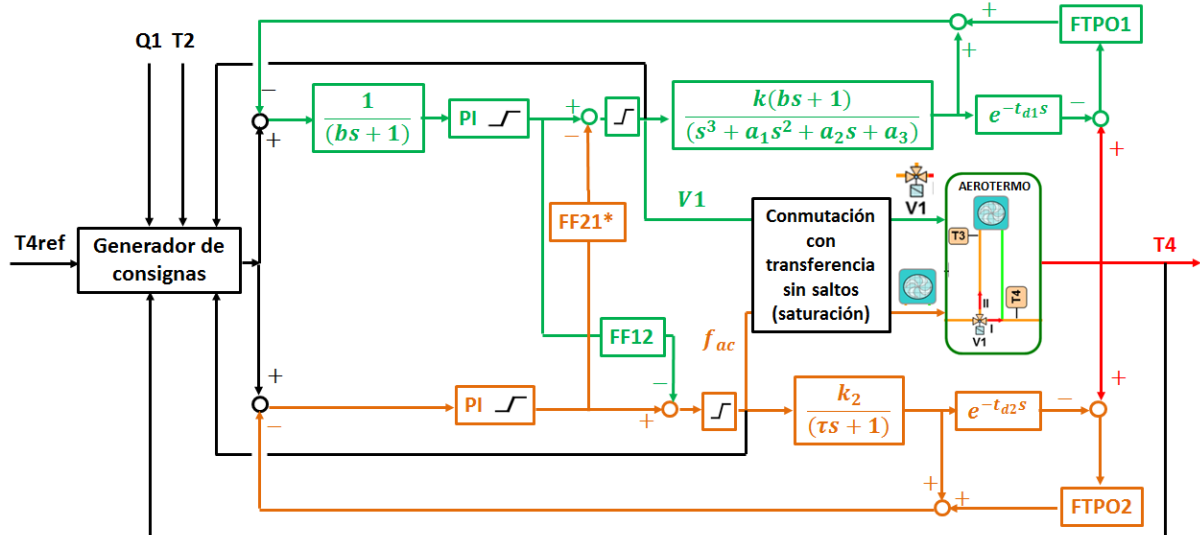
Figura 4: (1) Temperatura de salida del modelo y la del campo solar, (2) temperatura de entrada al campo solar y temperatura ambiente, (3) Irradiancia global, (4) caudal de entrada al campo solar



$$G_{fB1}(s) = Q1(s)/f_{B1}(s)$$

$$G_{Q1}(s) = T2(s)/Q1(s)$$

Figura 5: Respuestas temporales de los modelos lineales $Q1-f_{B1}$ y $T2-Q1$



*Sólo los términos invertibles
 FTPO: Función de transferencia de primer orden (filtro)

Figura 6: Esquema de control del bucle 2 - temperatura de mezcla aerotermo-campo solar

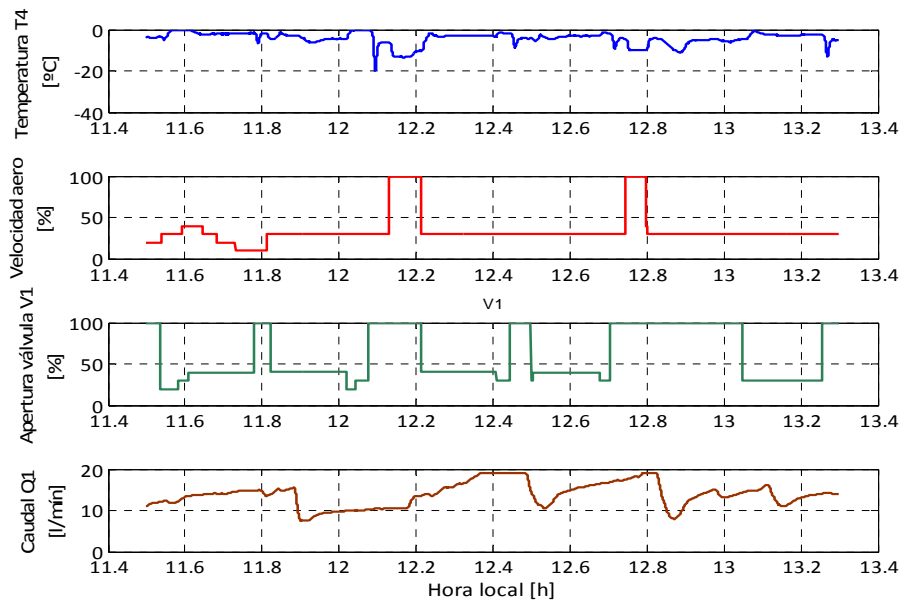
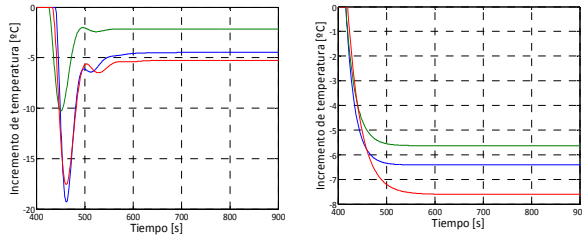


Figura 7: Escalones en bucle abierto en V1, f_{ac} y B1

En la figura 8 se muestran las respuestas temporales a un escalón en bucle abierto (del 0 al 100% del rango de cada actuador) obtenidas con las funciones de transferencia que relacionan T_4 con V_1 y f_{ac} respectivamente. El cero que aparece en la respuesta asociada a T_4 (temperatura de mezcla) cuando se actúa sobre la válvula procede del desplazamiento de agua más fría que T_2 contenida en el circuito del aerotermo. En función de la dinámica observada y como se puede observar en la segunda parte de este trabajo, se propuso un esquema de control (figura 6) formado por dos bucles incluyendo cada uno un predictor de Smith filtrado [23], donde los filtros sobre el error de estimación de la salida son de primer orden (bloque FTPO1 y FTPO2), dos

controladores PI, dos términos para desacoplar o compensar la perturbación que cada bucle provoca sobre el otro en el momento de la conmutación (bloques FF12 y FF11), un bloque de conmutación con transferencia sin saltos para cambiar de un controlador a otro cuando uno de los sistemas entra en saturación y un generador de consignas que tiene también en cuenta los valores de las perturbaciones Q_1 y T_2 que entran al bucle para seleccionar el incremento en la temperatura de referencia adecuada a cada uno de los bucles de control (al ser estos implementados en forma de modelo de perturbaciones en torno a un punto de trabajo). El esquema de control completo se muestra en la figura 6.



$G_{V1}(s) = T4(s)/V1(s)$ $G_{f_{ac}}(s) = T4(s)/f_{ac}(s)$
 Figura 8: Respuestas temporales de los modelos lineales T4-V1 y T4- f_{ac}

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

Para controlar la temperatura de entrada al intercambiador del módulo MD (T10) se podría emplear un esquema similar al bucle 2. Sin embargo, se ha implementado un esquema preliminar más sencillo. Las variables que hay que controlar son el caudal Q3 asociado al intercambiador y la temperatura de entrada T10. En la actualidad, la operación de la planta se realiza fijando el caudal Q3 que circula por la rama derecha del intercambiador a un valor igual a Q10, que es el caudal de alimentación de agua salada al módulo MED. Fijando esa igualdad y para cada valor de Q10 en los rangos establecidos para la operación (de 400 a 600 l/h, aunque realmente se suele trabajar con tres niveles), el gradiente de temperatura $\Delta T = T10 - T15$ en el intercambiador se mantiene aproximadamente constante durante el ensayo (en la figura 9 se puede ver la evolución de dichas temperaturas en un ensayo manual para un día claro – los datos completos se incluyeron en [14]). Por tanto, se controla el caudal de la bomba B3 mediante un controlador PI (actuando sobre la frecuencia de su variador) para que $Q3=Q10$ y T10 se controla variando la posición de la válvula de tres vías V5. Las posibles perturbaciones a este bucle son Q10 (que se mantiene constante), T18 (que se controla a través de una enfriadora), T8 (temperatura de entrada al bucle) y T11 (temperatura de retorno del intercambiador). Hay que hacer notar que cuando V5 está totalmente abierta y $Q2 > Q3$, $T10 \approx T4$ y la temperatura de entrada al módulo MD se controla a través del bucle 2 descrito en la sección previa. El esquema de control se muestra en la figura 10. El controlador por adelantado (FF) se calcula a través de un sencillo balance de energía en estado estacionario considerando que Q10 es constante, proporcionando la siguiente ecuación:

$$v_{5,FF}(\%) = \frac{T10_{ref} - T11}{T8 - T11} \cdot 100 \quad (3)$$

Como en el caso de bucle 1, el controlador PI se diseña utilizando funciones de transferencia identificadas mediante ensayos en escalón en bucle

abierto con el módulo FF activado. Ejemplos de las respuestas temporales de esas funciones de transferencia se han incluido en la figura 11.

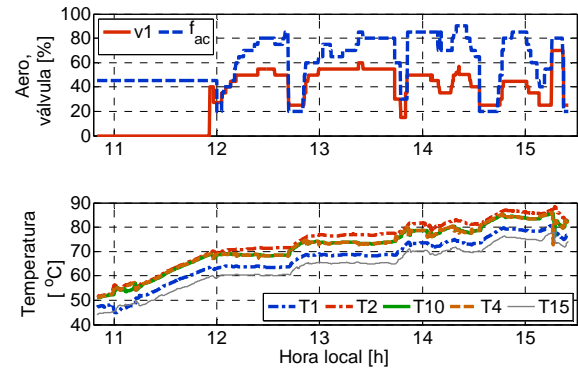


Figura 9: Ejemplo de evolución de las temperaturas en el intercambiador MD en un ensayo manual

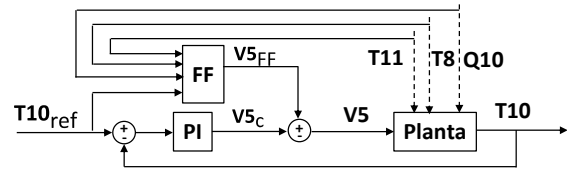


Figura 10: Esquema de control del bucle 3 - temperatura de entrada al intercambiador de calor del módulo MD

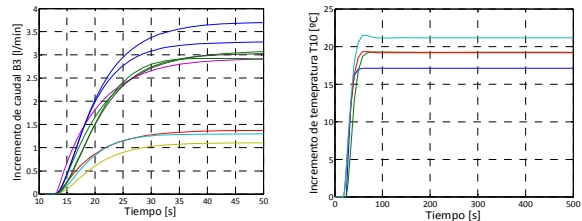


Figura 11: Respuestas incrementales en bucle abierto en simulación usando los modelos Q3- f_{B3} y T10-V5.

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

Con la finalidad de facilitar la lectura integral, todas las referencias bibliográficas que se han citado se han incluido en la segunda parte de este trabajo titulada “Control de plantas de destilación por membranas con apoyo de energía solar – Parte 2: Resultados”.