

UNIVERSIDAD DE ALMERIA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
MÁSTER EN INFORMÁTICA AVANZADA E
INDUSTRIAL

“Generador de consignas para una planta de destilación por membranas alimentada con energía solar”

Curso 2015/2016

Alumno/a:
Juan Diego Gil Vergel

Director/es:
Dr. D. Manuel Berenguel Soria
Dra. Dña. Lidia Roca Sobrino



Trabajo Fin De Máster:

Generador de consignas para una planta de destilación por
membranas alimentada con energía solar

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA



Autor:

Juan Diego Gil Vergel

Directores:

Dr. D. Manuel Berenguel Soria

Dra. Dña. Lidia Roca Sobrino

Agradecimientos

En primer lugar agradecer la financiación del trabajo al Proyecto del Plan Nacional DPI2014-56364-C2-1-R (ENERPRO) del Ministerio de Economía y Competitividad y Fondos FEDER.

En segundo lugar y en especial, agradecer a mis dos tutores, Manuel Berenguel Soria y Lidia Roca Sobrino, por el tiempo que han dedicado a este proyecto, por saber guiarme en todo momento y, sobretodo, por la confianza depositada en mí. Gracias a los conocimientos y valores que me han transmitido ha sido posible desarrollar este trabajo. Son para mi un ejemplo a seguir.

Para finalizar, me gustaría agradecer de forma general a todos los integrantes del grupo de investigación de Automática, Robótica y Mecatrónica (TEP-197) de la universidad de Almería, así como a los investigadores del grupo desalación de la Plataforma Solar de Almería por toda la ayuda prestada. Trabajar y compartir el día a día con ellos es, sin duda alguna, un privilegio.

Índice

Agradecimientos	I
Índice de figuras	V
Índice de tablas	VII
1. Introducción y revisión bibliográfica	1
2. Sistema Destilación por Membranas Alimentado con energía Solar (SMD)	2
2.1. Tecnología Destilación por Membranas (MD)	2
2.2. Descripción de la planta piloto SMD	4
3. Material empleado para el desarrollo del proyecto	7
4. Modelado del sistema	7
4.1. Modelado del intercambiador	7
4.2. Calibración del modelo	10
4.3. Validación del modelo	11
5. Análisis de la actuación del sistema de control directo	11
6. Generador de consignas	15
6.1. Prueba del generador de consigna en simulación	16
6.2. Prueba del generador de consigna en la instalación real	19
7. Conclusiones y trabajos futuros	22

Índice de figuras

1.	Diferentes configuraciones MD [1].	5
2.	Planta piloto SMD situada en la Plataforma Solar de Almería (PSA).	6
3.	Módulo piloto de Aquastill en la PSA.	6
4.	Diagrama esquemático de las membranas en forma de espiral [2].	7
5.	Diagrama esquemático de la instalación.	8
6.	Validación modelo del intercambiador a 60°C. (1) Temperatura caliente de entrada al modelo ($TT5$), temperatura caliente de salida ($TT6$) y salida del modelo ($TT6_m$), (2) temperatura fría de entrada al modelo ($TT9$), temperatura de salida del lado frío del intercambiador ($TT8$) y salida del modelo ($TT8_m$) y (3) caudal del fluido caliente ($FT3$) y caudal del fluido frío ($FT4$).	9
7.	Validación modelo del intercambiador a 70°C. (1) Temperatura caliente de entrada al modelo ($TT5$), temperatura caliente de salida ($TT6$) y salida del modelo ($TT6_m$), (2) temperatura fría de entrada al modelo ($TT9$), temperatura de salida del lado frío del intercambiador ($TT8$) y salida del modelo ($TT8_m$) y (3) caudal del fluido caliente ($FT3$) y caudal del fluido frío ($FT4$).	9
8.	Validación modelo del intercambiador a 80°C. (1) Temperatura caliente de entrada al modelo ($TT5$), temperatura caliente de salida ($TT6$) y salida del modelo ($TT6_m$), (2) temperatura fría de entrada al modelo ($TT9$), temperatura de salida del lado frío del intercambiador ($TT8$) y salida del modelo ($TT8_m$) y (3) caudal del fluido caliente ($FT3$) y caudal del fluido frío ($FT4$).	10
9.	Diagrama esquemático de la instalación con los bucles de control.	12
10.	Prueba de control en la planta. Bucle de control 1 y 2. (1) Temperatura de entrada al campo solar ($TT1$), referencia para el bucle 1 y 2 (SP), salida del bucle 1 ($TT2$) y salida del bucle 2 ($TT3$), (2) caudal del campo ($FT1$) y referencia de caudal ($FT1_{SP}$), (3) frecuencia de funcionamiento de la B1 (F_{B1}) y del aerotermo (F_{aer}) y (4) irradiancia global (I).	13
11.	Prueba de control en la planta. Bucle de control 3 y 4. (1) Temperatura caliente de entrada al intercambiador ($TT5$), referencia ($TT5_{SP}$), temperatura caliente de salida del intercambiador ($TT6$) y perturbación al lazo de control ($TT4$), (2) apertura de V5, (3) caudal de entrada al intercambiador ($FT3$) y (4) frecuencia de funcionamiento de la B3.	13
12.	Temperaturas y caudal dentro del módulo. (1) Temperatura fría de entrada al intercambiador ($TT9$) y temperatura de salida del lado frío del intercambiador ($TT8$) y (2) caudal dentro del módulo MD ($FT4$).	14
13.	Producción de destilado. (1) Litros de destilado producidos a lo largo del ensayo (D) y (2) flujo de destilado (D_{Flujo}).	14
14.	Esquema del generador de consignas.	16
15.	Pseudocódigo del algoritmo generador de consignas.	16
16.	Datos reales usados para la simulación. (1) Temperatura ambiente ($T_{ambiente}$) y (2) irradiancia global (I).	17
17.	Prueba del generador de consignas en simulación. Bucles 1 y 2. (1) Referencia para el bucle 1 y 2 (SP), salida del bucle 1 ($TT2$) y salida del bucle 2 ($TT3$), (2) caudal del campo ($FT1$) y referencia de caudal ($FT1_{SP}$) y (3) frecuencia de funcionamiento de la B1 (F_{B1}) y del aerotermo (F_{aer}).	17

18.	Prueba del generador de consignas en simulación. Bucles 3 y 4. (1) Temperatura caliente de entrada al intercambiador ($TT5$), referencia ($TT5_{SP}$), (2) apertura de V5, (3) caudal de entrada al intercambiador ($FT3$) y referencia ($FT3_{SP}$) y (4) frecuencia de funcionamiento de la B3.	18
19.	Prueba del generador de consignas en simulación. Caudal y temperatura dentro del módulo. Temperatura de salida del lado frío del intercambiador ($TT8$) y referencia ($TT8_{SP}$) y (2) caudal dentro del módulo MD ($FT4$).	18
20.	Prueba del generador de consignas en la instalación real. Bucle 1 y 2.(1) Temperatura de entrada al campo solar ($TT1$), referencia para el bucle 1 y 2 (SP), salida del bucle 1 ($TT2$) y salida del bucle 2 ($TT3$), (2) caudal del campo ($FT1$) y referencia de caudal ($FT1_{SP}$), (3) frecuencia de funcionamiento de la B1 (F_{B1}) y del aerotermo (F_{aer}) y (4) irradiancia global (I).	20
21.	Prueba del generador de consignas en en la instalación real. Bucle 3 y 4.(1) Temperatura caliente de entrada al intercambiador ($TT5$), referencia ($TT5_{SP}$), temperatura caliente de salida del intercambiador ($TT6$) y perturbación al lazo de control ($TT4$), (2) apertura de V5, (3) caudal de entrada al intercambiador ($FT3$) y referencia ($FT3_{SP}$) y (4) frecuencia de funcionamiento de la B3.	20
22.	Prueba del generador de consignas en la instalación real. Caudal y temperaturas dentro del módulo. Temperatura fría de entrada al intercambiador ($TT9$), temperatura de salida del lado frío del intercambiador ($TT8$) y referencia ($TT8_{SP}$) y (2) caudal dentro del módulo MD ($FT4$).	21
23.	Producción de destilado. (1) Litros de destilado producidos a lo largo del ensayo (D) y (2) flujo de destilado (D_{Flujo}).	21

Índice de tablas

1.	Tabla de acrónimos.	3
2.	Variables de la planta.	4
3.	Parámetros del modelo.	7
4.	Valores de α_{he}	11

Generador de consignas para una planta de destilación por membranas alimentada con energía solar

Resumen – En este trabajo se presenta el desarrollo de un generador de consignas automático para una planta piloto de destilación por membranas alimentada con energía solar, situada en la Plataforma Solar de Almería (PSA), perteneciente al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). El generador de consignas permite fijar unas condiciones de operación adecuadas de temperatura a la entrada del sistema de destilación, actuando sobre el sistema de control directo ya implementado en la planta. De este modo, se consigue mejorar notablemente la automatización de operación de la planta, así como la eficiencia de la misma. En primer lugar, se presentan estudios en simulación para analizar las prestaciones del sistema. Posteriormente, se muestran los resultados reales de la aplicación de esta técnica en la instalación de destilación por membranas.

Palabras clave – Destilación por membranas, sistemas de control, generador de consignas, energía solar.

Abstract – This work presents the development of a reference governor for a pilot membrane distillation facility powered with solar energy located at PSA, a dependency of CIEMAT. The reference governor allows to fix a suitable operating temperature at the inlet of the distillation system, which is maintained with the direct control system already implemented on the plant. Thus, it is possible to improve operation quality by automation. First, simulation tests are presented in order to analyze the system performance. Secondly, real experimental tests of this technique at the real facility are shown.

Key words – Membrane distillation, control systems, reference governor, solar energy.

1. Introducción y revisión bibliográfica

Hoy en día la escasez de agua potable es uno de los principales problemas en el mundo. La demanda de agua para uso humano, agrario e industrial se incrementa constantemente, provocando una sobreexplotación de los recursos actuales y sobrepasando el límite de renovación de dicho recurso. Consecuentemente, las tecnologías de desalación se han convertido en una necesidad, sobre todo en zonas áridas o semiáridas con escasez de agua. La gran cantidad de energía requerida por los procesos de desalación hace que estas tecnologías deban ser asociadas con fuentes de energía renovables para su sostenibilidad [3]. El uso de energía renovable para este propósito no solo ayuda a solucionar el problema del déficit agua sino que también contribuye a evitar el uso de combustibles fósiles, creando un desarrollo sostenible y eficiente [4]. Además, la alta disponibilidad de irradiancia en zonas con escasez de agua hace que la energía solar sea la fuente de energía más adecuada para las plantas de desalación.

En este contexto la Destilación por Membranas (MD), es una tecnología adecuada para necesidades medias de agua en zonas con disponibilidad de irradiancia solar [1, 5]. Esta tecnología destaca porque puede ser fácilmente acoplable con tecnologías solares bien establecidas gracias a sus bajos requerimientos de mantenimiento y baja temperatura de operación. Sin embargo, no ha sido comercializada todavía, debido principalmente a la baja producción de flujo de destilado y a problemas técnicos tales como el diseño del módulo y la humectación

de la membrana, al igual que a la incertidumbre asociada a los costes económicos y energéticos [6]. Una de las pocas plantas descritas totalmente en la literatura es la planta piloto de destilación por membranas situada en la PSA [1], el mayor centro de investigación en la energía solar de Europa.

Como todos los sistemas industriales que funcionan con energía solar, el principal problema a tener en cuenta en el proceso de destilado es la naturaleza impredecible de la fuente de energía. De este modo, diferentes tipos de diseño de módulos y membranas son evaluadas en las investigaciones actuales con el fin de estudiar la producción de destilado, poder térmico específico y la eficiencia térmica [7, 8]. Las campañas experimentales llevadas a cabo en estos estudios requieren condiciones estacionarias en las principales variables involucradas en el proceso, las cuales son difíciles de conseguir teniendo en cuenta la naturaleza intermitente de la fuente de alimentación. Este hecho justifica el desarrollo de un sistema de control específico capaz de mantener en condiciones estacionarias las principales variables del proceso [9, 10, 11].

En la literatura hay muy pocos trabajos centrados en el control de procesos de Destilación por Membranas Alimentado con energía Solar (SMD). En [12] se desarrolla un modelo de una planta piloto SMD de forma que se compara un sistema de optimización con una función objetivo que tiene en cuenta la producción y el consumo energético térmico, con un sistema de control para temperatura basado en controladores ON/OFF. En [13] nuevamente se proponen controladores ON/OFF para el control de la diferencia de temperatura que se produce entre el campo solar y el tanque de almacenamiento térmico de forma que se establecen dos modos de operación: diario y nocturno. En [14] se desarrolla una estrategia de control más completa en la cual se prueban dos bucles de control en simulación para el control del campo solar de alimentación. En [5] se utiliza un red neuronal para el desarrollo de un sistema de control que optimiza la producción de destilado en función de las condiciones de operación. Además, el modelo de red neuronal fue utilizado 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 primer trabajo en el cual se trata el problema de la generación de consignas para este tipo de

plantas es en [15], donde se desarrolla un sistema de control por realimentación para la generación de consignas dentro del módulo de destilación con el fin de mantener una diferencia de temperatura deseada entre las dos partes de las membranas. A diferencia de este enfoque, este trabajo se centrará en la generación de consignas para el sistema de control directo presentado en [10, 11] que incluye el control de temperatura del campo solar, el control de un bloque de enfriamiento (aerotermino) y de un sistema de mezcla a la entrada de la unidad MD. Mediante este sistema se consigue un fuerte rechazo a las perturbaciones provenientes de la naturaleza intermitente de la fuente de alimentación, se reduce el uso de fuentes de energía no renovables y se mejora la operación manual de la planta. Además, en [9] se establecieron 14 modos de operación para esta planta y se mostraron ensayos en modo manual, junto a una explicación del procedimiento habitual de operación.

Teniendo como base estos trabajos y utilizando el modo directo con aerotermino, se continúa completando el sistema de control de la planta mediante el desarrollo de un sistema de generación de consignas que tiene como objetivo mantener constante la temperatura de entrada de la fuente caliente actuando sobre el sistema de control directo ya implementado en la planta. Objetivos adicionales son minimizar los costes de operación y el uso de energía no renovable.

2. Sistema SMD

2.1. Tecnología MD

El principio de funcionamiento básico del proceso de desalación mediante destilación por membranas es conocido desde 1963, pero aún se sigue desarrollando en pequeñas plantas piloto de experimentación y como se ha mencionado anteriormente no ha sido implementado todavía industrialmente [1].

MD es un proceso de separación impulsado térmicamente que puede ser utilizado para llevar a cabo la separación del vapor de agua de la sal mediante una membrana hidrófoba y microporosa. Como resultado de la diferencia de presión a los dos lados de la membrana, lograda mediante un diferencia de temperatura, las moléculas de vapor de agua

Abreviatura	Significado
aer	Aerotermino
AGMD	Destilación por membrana con espacio de aire <i>Air Gap Membrane Distillation</i>
B1	Bomba del campo solar
B2	Bomba de distribución del tanque
B3	Bomba de entrada al intercambiador
DCMD	Destilación por contacto directo <i>Direct Contact Membrane Distillation</i>
FF	Control por adelanto <i>Feedforward</i>
GA	Algoritmo genético <i>Genetic Algorithm</i>
LGMD	Destilación por membrana líquida <i>Liquid Gap Membrane Distillation</i>
MD	Destilación por membranas <i>Membrane Distillation</i>
MSE	Error cuadrático medio <i>Mean Squared Error</i>
PSA	Plataforma Solar de Almería
SCADA	Sistema de supervisión, adquisición de datos y control <i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
SGMD	Destilación con membranas con barrido de gas <i>Sweeping Gas Membrane Distillation</i>
SMD	Destilación por membranas alimentado con energía solar <i>Solar Membrane Distillation</i>
VMD	Destilación en condiciones de vacío <i>Vacuum Membrane Distillation</i>
V5	Válvula 5

Tabla 1: Tabla de acrónimos.

pasan a través de la membrana mientras que los componentes no-volátiles son rechazados. El proceso rechaza teóricamente el 100 % de los componentes no-volátiles y puede tratar soluciones con una alta salinidad. Además, no requiere un pretratamiento químico del agua de alimentación como ocurre en otras tecnologías de desalación. Los sistemas MD pueden ser clasificados según la diferencia de presión en la membrana: Destilación por Contacto Directo (DCMD), Destilación por Membrana con Espacio de Aire (AGMD), Destilación por Membranas con Barrido de Gas (SGMD), Destilación por Membrana Líquida (LGMD) y Destilación en Condiciones de Vacío (VMD) [16]. El esquema de las diferentes configuraciones está disponible en la Fig.1.

En la configuración DCMD una solución más fría

que la solución de alimentación (agua de mar) está en contacto directo con el lado permeable de la membrana. El vapor se mueve por la diferencia de presión entre los dos lados de la membrana y la evaporación se produce en la parte de la membrana que está en contacto con la solución de alimentación. Así las moléculas volátiles de la interfaz líquido-vapor creada en los poros de la membrana pasan a través de ella y se condensan en la interfaz líquido-vapor creada en el otro lado de la membrana por la solución de enfriamiento. El principal inconveniente de esta configuración son las pérdidas de calor a través de la membrana.

En la configuración AGMD se introduce un canal de aire estancado entre la membrana y la superficie de condensación reduciéndose las pérdidas de calor por conducción que se producen en la techno-

Variable	Descripción	Uds
D	Cantidad de destilado producido	L
FT1	Caudal del campo solar	L/min
FT3	Caudal de entrada al intercambiador	L/min
FT4	Caudal del módulo MD	L/min
I	Irradiancia global	W/m^2
TT1	Temperatura de entrada al campo solar	$^{\circ}C$
TT2	Temperatura de salida del campo solar	$^{\circ}C$
TT3	Temperatura de mezcla entre el campo solar y el aerotermo	$^{\circ}C$
TT5	Temperatura de entrada del lado caliente del intercambiador	$^{\circ}C$
TT6	Temperatura de salida del lado caliente del intercambiador	$^{\circ}C$
TT8	Temperatura de salida del lado frío del intercambiador	$^{\circ}C$
TT9	Temperatura de entrada del lado frío del intercambiador	$^{\circ}C$

Tabla 2: Variables de la planta.

logía DCMD. En este caso, la diferencia de presión también es utilizada como fuerza conductora y la evaporación tiene lugar en la superficie fría de la membrana. La principal desventaja de esta tecnología es que se incrementa la resistencia a la transferencia de masa.

En los módulos SGMD se utiliza un gas inerte para arrastrar el vapor fuera del módulo, donde se llevará a cabo la condensación. El inconveniente de la destilación SGMD es que la cantidad de destilado obtenido es más baja que la corriente de gas, y por tanto, requiere un condensador de grandes dimensiones, lo que encarece el proceso.

La tecnología LGMD es una modificación de la configuración AGMD en la cual el canal está lleno de destilado y por tanto se reducen tanto las pérdidas de calor por conducción como la resistencia a la transferencia de masa. En esta tecnología las moléculas son llevadas fuera de la membrana donde tiene lugar la condensación.

En los módulos VMD se aplica, en el lado permeable de la membrana, una presión de vacío más baja que la presión de saturación de las moléculas volátiles para ser separadas de la solución de alimentación. En este caso, la condensación también se lleva a cabo fuera del módulo, reduciéndose aún más las pérdidas a través de la membrana.

Las principales aplicaciones de la tecnología MD son la producción de agua de alta pureza y la eliminación de componentes volátiles como los compuestos orgánicos de las aguas residuales. Como ha sido remarcado anteriormente, las principales ven-

tajas de esta tecnología son: i) fácil modularidad del sistema, ii) bajos requerimientos de mantenimiento y iii) baja temperatura de operación variando entre $60^{\circ}C$ y $90^{\circ}C$. Estas características hacen que esta tecnología sea adecuada para acoplarla con energía solar permitiendo obtener una solución factible para el desarrollo de sistemas independientes de desalación [1].

2.2. Descripción de la planta piloto SMD

La planta piloto Fig. 2 consiste en una unidad de destilación MD conectada a un campo solar a través de un intercambiador de calor y a un sistema de distribución, al cual se puede habilitar varias conexiones simultáneas de diferentes sistemas [1].

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 $2082 \times 1082 \times 85$ mm. La superficie del absorbedor es de $2 m^2$ 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 $90^{\circ}C$ aproximadamente, utilizan-

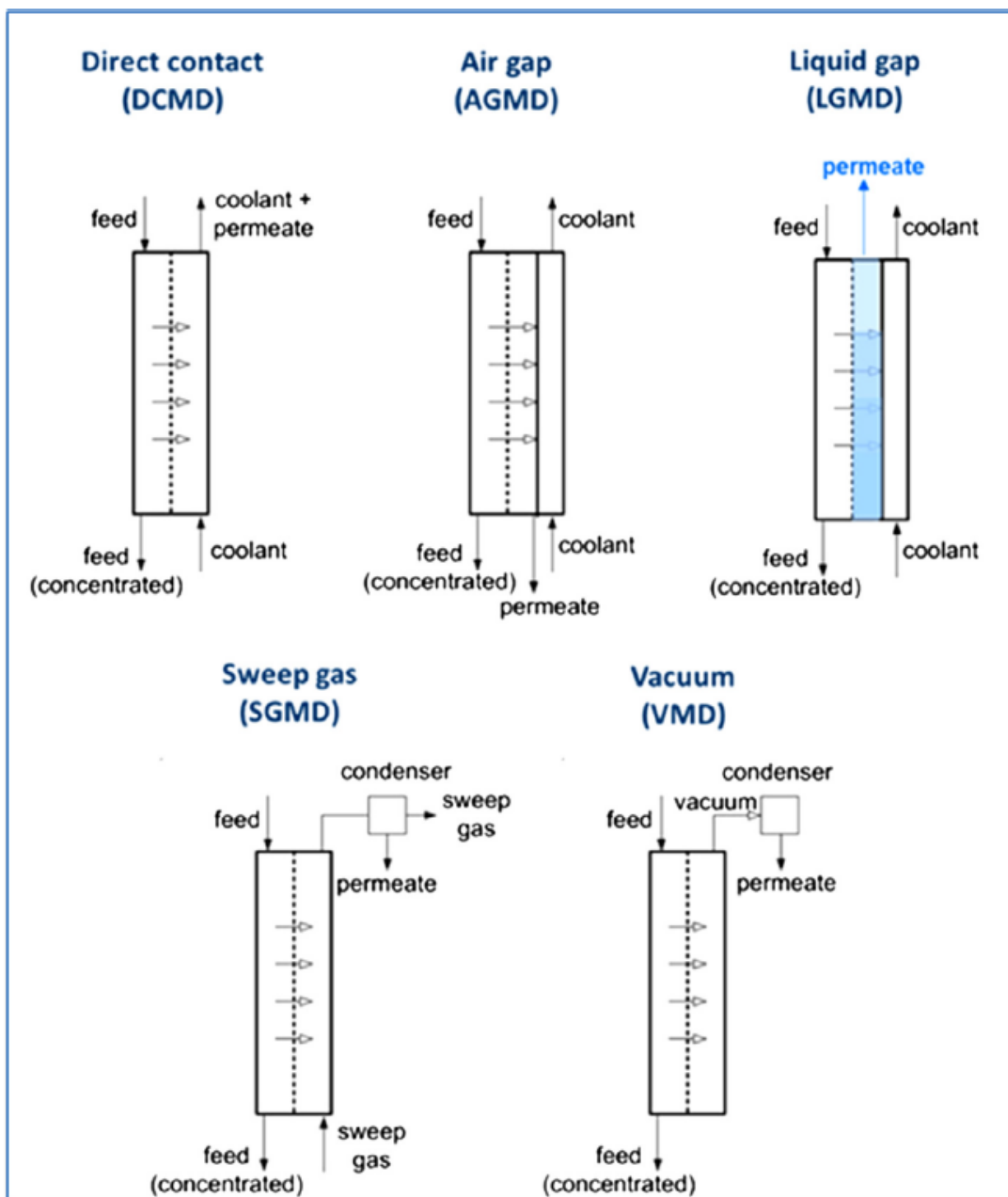


Figura 1: Diferentes configuraciones MD [1].

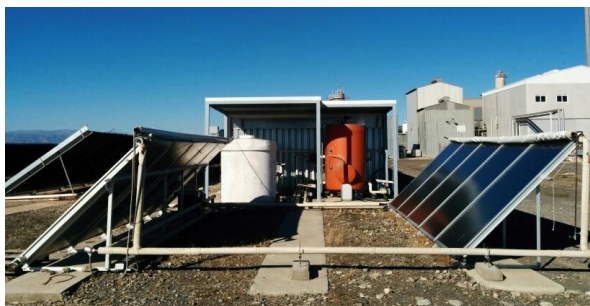


Figura 2: Planta piloto SMD situada en la PSA.



Figura 3: Módulo piloto de Aquastill en la PSA.

do agua desmineralizada como fluido térmico con anticongelante (GEO 100 FLUID, Saleplas) en una proporción de 22:100 (GEO FLUID: agua). 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 no se utiliza en el esquema de control tratado en este artículo, ya que se trabajará en acoplamiento directo entre el campo solar y el módulo MD. La temperatura del campo solar se controla manipulando el flujo másico de fluido usando B1 Fig. 5. Por otra parte, la salida de campo está equipada con un aerotermo para controlar el exceso de temperatura.

La conexión del sistema de distribución a las unidades MD, puede hacerse directamente, si tienen su propio intercambiador de calor, o por medio de un intercambiador de Titanio. En este caso un depósito grande ($2 m^3$), que contiene una solución acuosa con una concentración de sales marinas de alrededor de 35 g/L y con la conductividad deseada, se utiliza como fuente de agua salina pudiéndose controlar su temperatura mediante un enfriador de aire, que es utilizado antes en los módulos como refrigerante. Después, la solución se calienta en el intercambiador de calor usando la energía térmica solar proveniente del campo antes de entrar de nuevo a los módulos como alimentación caliente.

Hay otro circuito de refrigeración disponible para los casos en los cuales el flujo de refrigeración y la alimentación no estén acoplados. Este utiliza un depósito de las mismas dimensiones que el anterior con agua fría y dispone de un enfriador de aire para regular su temperatura.

Para este trabajo se ha considerado solo un tipo de módulo piloto construido por la compañía holandesa Aquastill Fig. 3, el cual consta de su propio intercambiador con una superficie de intercambio de $1.65 m^2$. Aquastill tiene un área efectiva de $24 m^2$ con una longitud de 5 m, un tamaño de poro nominal de 0.3 micras, una porosidad del 85% y un espesor de 76 micras. Los materiales utilizados para la lámina de condensador, espaciadores y cáscara son PETAL-PET, PP y poliuretano respectivamente [Aquastill, comunicación privada]. Este módulo está basado en la tecnología AGMD y utiliza membranas enrolladas en espiral cuyo es esquema se presenta en la Fig. 4. En [2] se presenta un estudio de la productividad de este módulo.

La instrumentación utilizada consta de medidores de flujo electromagnéticos (Promag 50P15 de Endress + Hauser), accionamiento rotativo con tec-

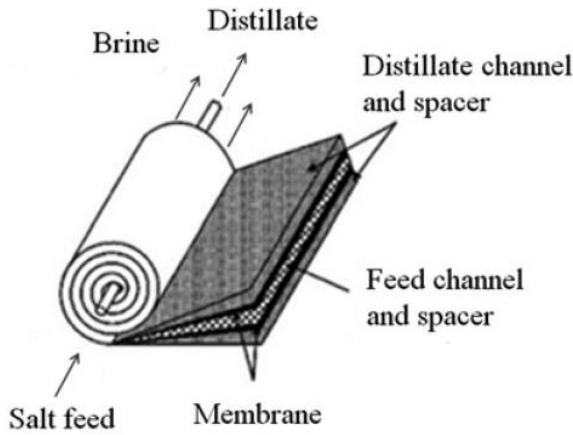


Figura 4: Diagrama esquemático de las membranas en forma de espiral [2].

nología 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 plano inclinado (35°) se utiliza un piranómetro (CM6B por Kipp + Zonen).

Todo el sistema se controla por medio de un Sistema de Supervisión, Adquisición de Datos y Control (SCADA) el cual monitoriza todas las variables que intervienen en el proceso con un tiempo de muestreo de 1 s a través de un sistema de adquisición avanzado de National Instruments.

3. Material empleado para el desarrollo del proyecto

Al tratarse de un proyecto de control a alto nivel y al tener la planta monitorizada a través de un sistema SCADA, todos los materiales utilizados han sido de tipo software:

1. Matlab, que consiste en un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo. Este software ha sido utilizado para el tratamiento de datos, para la identificación de modelos mediante su *toolbox* de optimización, para la validación de los modelos y para la simulación de las estrategias de control mediante su librería Simulink.

2. LabVIEW, que ha sido utilizado para el manejo de la planta a través del SCADA y para la implementación del sistema de control en la instalación real haciendo uso de su paquete *Math Script Node* para la importación de código Matlab. LabVIEW es una plataforma de programación gráfica que ayuda a escalar desde el diseño hasta pruebas y desde sistemas pequeños hasta grandes. Además, se puede integrar con software legado existente, IP y hardware aprovechando las últimas tecnologías de cómputo.

4. Modelado del sistema

Como se ha mencionado anteriormente el objetivo del presente trabajo es realizar un sistema generador de consignas con el fin de mantener en un valor determinado la temperatura TT8 en la Fig. 5, por lo que será necesario obtener un modelo del intercambiador de calor. En [9, 10, 11] se presentaron modelos completos de los principales componentes utilizados para el sistema de control directo.

Var	Magnitud física	Uds
A_s	Superficie de intercambio	1.65 m^2
c_p	Capacidad calorífica del agua	$4190 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
\dot{m}	Flujo másico	kg/s
α_{he}	Coefficiente de transferencia de calor	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
η_{he}	Factor auxiliar del intercambiador	–
θ_{he}	Factor auxiliar del intercambiador	–
Subín	Descripción	Var
m	modelo	–
1	Referente al fluido 1	FT3
2	Referente al fluido 2	FT4

Tabla 3: Parámetros del modelo.

4.1. Modelado del intercambiador

Un intercambiador de calor es un dispositivo cuya función principal es transferir calor de un fluido a otro. Este dispositivo es típicamente clasificado de acuerdo a la disposición de su flujo y del tipo de construcción. La disposición de los flujos puede ser

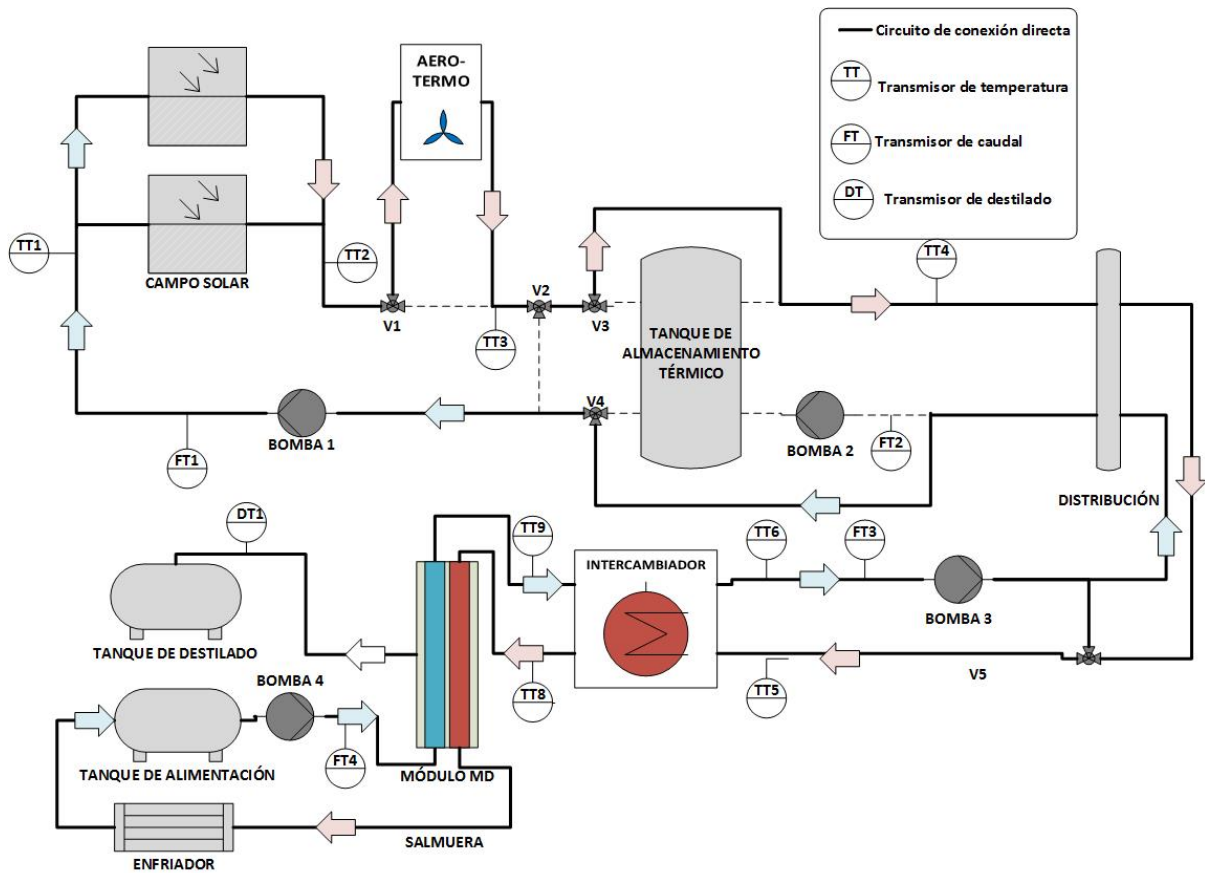


Figura 5: Diagrama esquemático de la instalación.

paralela, a contracorriente o transversal siendo la disposición a contracorriente la más común ya que es la que obtiene una mayor eficiencia de intercambio.

De esta forma, el intercambiador de calor de la instalación tiene una disposición de flujo en contracorriente, por lo que puede ser modelado mediante un modelo estacionario basado en primeros principios presentado en [17]. Este modelo consiste en un modelo algebraico centrado en un punto de operación y ha sido llevado a cabo teniendo en cuenta las siguientes hipótesis:

- No hay cambio de fase en el interior del intercambiador. Se asume que los dos fluidos que intervienen en el intercambiador son líquidos y nunca llegan a condiciones de saturación.
- Todo el calor que cede un fluido lo recupera el otro. Se desprecian las pérdidas de calor con

las paredes del intercambiador.

- No hay caída de presión en el intercambiador. Se desprecia la fricción de los líquidos con las paredes del intercambiador.
- Se desprecia la acumulación de masa de los fluidos en el intercambiador. Se asumen incompresibles y se desprecia la dilatación, el flujo másico de entrada es el mismo que el de salida.
- Se asumen propiedades termodinámicas uniformes para cada uno de los fluidos.

Así, el modelo puede ser usado para calcular la temperatura de salida de ambos fluidos dando por conocida las de entrada. Considerando que el fluido 1 (FT3 en Fig. 5) da energía al fluido 2 (FT4 en Fig. 5) la temperatura de salida en ambos lados del

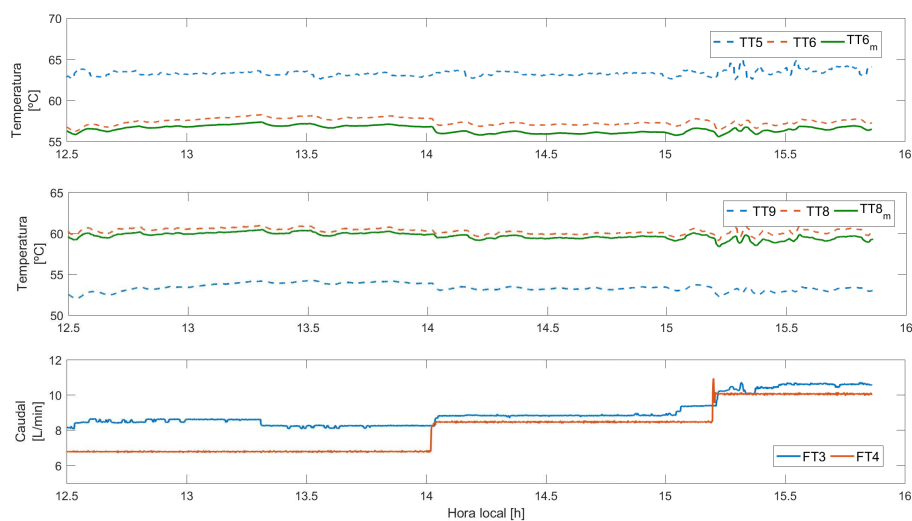


Figura 6: Validación modelo del intercambiador a 60°C. (1) Temperatura caliente de entrada al modelo ($TT5$), temperatura caliente de salida ($TT6$) y salida del modelo ($TT6_m$), (2) temperatura fría de entrada al modelo ($TT9$), temperatura de salida del lado frío del intercambiador ($TT8$) y salida del modelo ($TT8_m$) y (3) caudal del fluido caliente ($FT3$) y caudal del fluido frío ($FT4$).

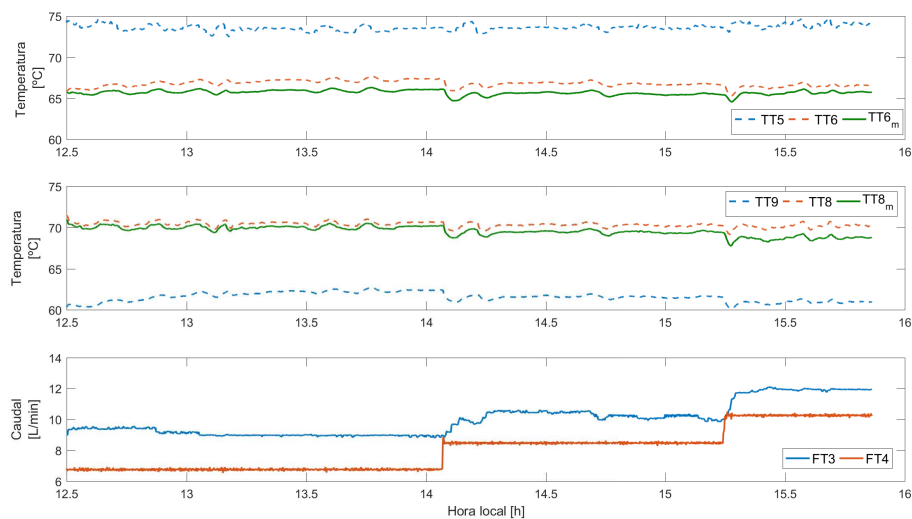


Figura 7: Validación modelo del intercambiador a 70°C. (1) Temperatura caliente de entrada al modelo ($TT5$), temperatura caliente de salida ($TT6$) y salida del modelo ($TT6_m$), (2) temperatura fría de entrada al modelo ($TT9$), temperatura de salida del lado frío del intercambiador ($TT8$) y salida del modelo ($TT8_m$) y (3) caudal del fluido caliente ($FT3$) y caudal del fluido frío ($FT4$).

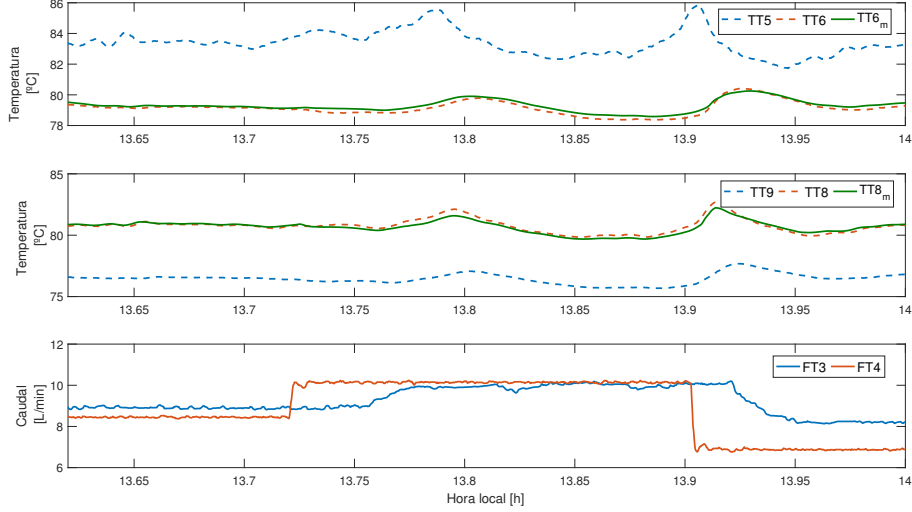


Figura 8: Validación modelo del intercambiador a 80°C. (1) Temperatura caliente de entrada al modelo ($TT5$), temperatura caliente de salida ($TT6$) y salida del modelo ($TT6_m$), (2) temperatura fría de entrada al modelo ($TT9$), temperatura de salida del lado frío del intercambiador ($TT8$) y salida del modelo ($TT8_m$) y (3) caudal del fluido caliente ($FT3$) y caudal del fluido frío ($FT4$).

intercambiador es dada por:

$$TT6_m = TT5 - \eta_{he,1} \cdot (TT5 - TT9) \quad (1)$$

$$TT8_m = TT9 + \eta_{he,2} \cdot (TT5 - TT6_m) \quad (2)$$

donde:

$$\eta_{he,1} = \frac{1 - e^{\theta_{he}}}{1 - \frac{\dot{m}_1 \cdot c_{p,1}}{\dot{m}_2 \cdot c_{p,2}} e^{\theta_{he}}} \quad (3)$$

$$\eta_{he,2} = \frac{\dot{m}_1 \cdot c_{p,1}}{\dot{m}_2 \cdot c_{p,2}} \quad (4)$$

$$\theta_{he} = \alpha_{he} \cdot A_s \left(\frac{1}{\dot{m}_1 \cdot c_{p,1}} - \frac{1}{\dot{m}_2 \cdot c_{p,2}} \right) \quad (5)$$

Debido a que se trata de un modelo estático centrado en un punto de operación, este debe ser calibrado para los diferentes puntos de operación de la planta. Para llevar a cabo las campañas experimentales, en la planta se trabaja en tres rangos de temperatura dentro del módulo TT8: 60, 70 y 80 °C, utilizándose tres caudales (FT4) en cada rango: 400, 500 y 600 L/h. De este modo, el parámetro α_{he} debe caracterizarse para estos puntos de operación.

4.2. Calibración del modelo

El modelo del intercambiador puede ser clasificado como un modelo de caja gris, ya que contiene una estructura teórica bien conocida y un parámetro que debe ser caracterizado utilizando datos reales. De este modo, la calibración del modelo puede ser planteada como un problema de optimización. Para formular la función objetivo, varios tipos de métricas pueden ser utilizadas. En este caso se ha decidido utilizar el Error Cuadrático Medio (MSE):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sqrt{(\hat{Y}(k) - Y(k))^2} \quad (6)$$

donde $\hat{Y}(k)$ es el valor de la salida del modelo en el instante discreto de tiempo k e $Y(k)$ es la medida real en el mismo instante. N es el número de medidas usadas para la calibración. Una forma precisa de resolver el problema de optimización, consiste en utilizar un algoritmo de búsqueda global como es el Algoritmo Genético (GA), combinado con uno de búsqueda local. El GA consiste en una técnica de computación evolutiva que imita los principios de la evolución biológica, modificando repetidamente

una población de puntos individuales utilizando reglas basadas en el modelado de combinación genética en reproducción biológica. Este algoritmo tiene una naturaleza aleatoria, por lo que mejora los resultados obtenidos con otros algoritmos de optimización global. Así, este método ha sido implementado usando el toolbox de optimización de Matlab, de forma que, primero se ha resuelto el problema utilizando el GA, utilizando la solución dada por este algoritmo como punto de inicio para el algoritmo de búsqueda local. En este caso, el algoritmo de búsqueda local es el `fmincom` del toolbox de optimización de Matlab, utilizándose como algoritmo de búsqueda el algoritmo del punto interior. Este algoritmo es tolerante a fallos de evaluación en funciones objetivo y permite estimar matrices *hessianas* mediante el algoritmo de Broyden Fletcher Goldfarb Shanno (BFGS). Además, permite calcular los productos *hessiana* por vector en una función sin tener que formar la matriz *hessiana* explícitamente.

4.3. Validación del modelo

Los valores del parámetro α_{he} caracterizados según el método descrito en la sección 3.2 se presenta en la siguiente tabla:

Temperatura [°C]	Caudal [L/h]	α_{he}
60	400	480.29
	500	582.81
	600	754.05
70	400	530.22
	500	689.30
	600	857.13
80	400	476.44
	500	593.40
	600	670.78

Tabla 4: Valores de α_{he} .

Con el fin de conseguir una mejor representación dinámica del sistema, se ha añadido un filtro de primer orden y un tiempo de retardo a cada una de las salidas del modelo. En el caso de $TT6_m$ la constante de tiempo representativa vale 40 s, mientras que el tiempo de retardo es de 23 s. Para $TT8_m$ la constante de tiempo representativa es de 20 s y el tiempo de retardo es de 15 s.

La validación del modelo se puede ver en las figuras Fig. 6, 7 y 8. En todas las figuras la curva verde corresponde con la salida del modelo, mientras que las demás curvas son las entradas proporcionadas y los valores reales de las temperaturas TT6 y TT8. Como se puede apreciar en los tres rangos de temperatura el modelo se ajusta bastante bien a la temperatura real, aunque se puede observar un pequeño error de *offset* en las temperaturas de 60 y 70 °C. Este error puede deberse a que se está utilizando un único parámetro para modelar dos salidas, o a pérdidas de calor en el sistema real no contempladas en el modelo. De este modo, el error cometido por el modelo está en torno a los 0.33 °C, siendo el error máximo de 0.63 °C para TT6 mientras que el error medio para TT8 es 0.17 °C siendo el error máximo 0.58 °C. Si el coeficiente de transferencia de calor hubiera sido constante para todo el rango de operación, el error medio para TT6 sería 0.46 °C y el error máximo 0.67 °C mientras que el error medio para TT8 sería 0.24 °C y el error máximo 0.63 °C. Los errores están dentro del propio rango de precisión de los instrumentos.

5. Análisis de la actuación del sistema de control directo

Actualmente la planta piloto está equipada con un sistema de control directo ampliamente descrito en [9, 10, 11] y que consta de los siguiente bucles representados en la Fig. 9:

- Bucle 1. Bucle de control del campo solar, con el cual se controla la temperatura de salida TT2 rechazando las perturbaciones de radiación, temperatura ambiente y temperatura de entrada al campo solar gracias a la acción de un controlador por prealimentación o Feedforward (FF) en configuración paralela que lleva implementado el modelo en estático del campo solar.
- Bucle 2. Bucle de control del bloque de enfriamiento, en el que se controla la temperatura TT3 actuando sobre el aerotermo.
- Bucle 3. Bucle de control del sistema de mezcla, donde se actúa sobre V5 con el fin de controlar la temperatura de entrada al intercambiador de calor TT5.

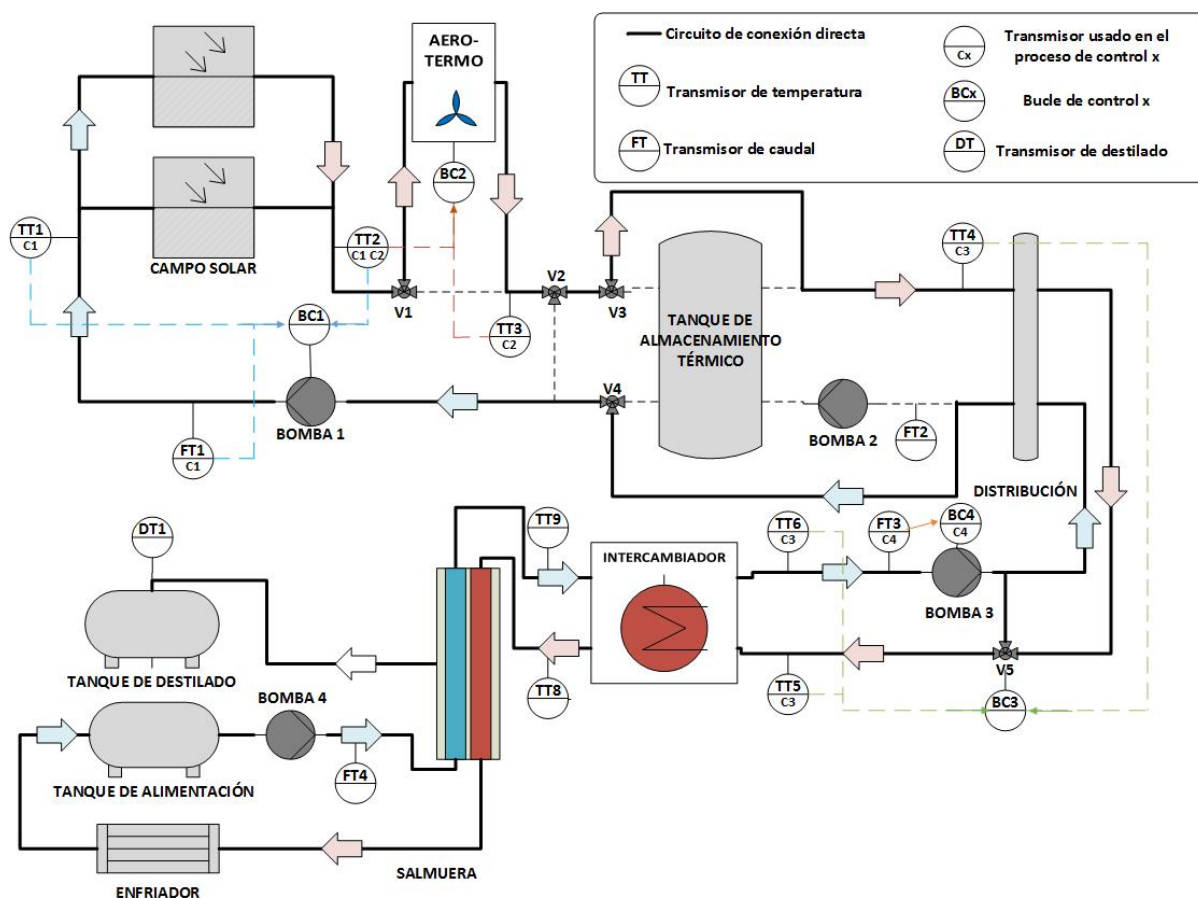


Figura 9: Diagrama esquemático de la instalación con los bucles de control.

- Bucle 4. Bucle de control de caudal a la entrada del intercambiador, actuando sobre la bomba 3.

En la forma de operación actual, tanto en el sistema de control del campo solar como en el sistema de control del bloque de enfriamiento se fija la misma referencia, que suele ser entre 3 y 10 °C superior a la deseada en TT5, este gradiente suele ser constante siempre y cuando $FT1 > FT3$, de otro modo retornaría fluido frío por el sistema de distribución hacia el módulo MD. Este hecho se tiene en cuenta en el sistema de control mediante una condición que baja la referencia de FT3 en le momento que este sea mayor que FT1. Así, se consigue controlar TT2 con el bucle de control del campo hasta que este se satura o la diferencia de temperatura entre la salida del campo TT2 y la referencia TT2_{SP} sea

mayor de un grado, momento en el que se empieza a usar el aerotermo para mantener TT3 en el valor deseado. En cuanto al bucle de control del sistema de mezcla, se fija una referencia en torno a 2.5 °C por encima de la temperatura deseada en la entrada caliente del módulo TT8.

Esta metodología de operación se puede comprobar en las Fig. 10, 11 y 12. En la operación presentada, se hizo una prueba en dos rangos de temperatura dentro del módulo: 60 y 70 °C, como se puede apreciar en la Fig. 12.

De este modo, la referencia puesta en el bucle 1 y 2 es de 70 °C cuando se trabaja a 60°C dentro del módulo y de 80 °C cuando se trabaja a 70 °C, como se presenta en la Fig. 10. Manteniendo la temperatura del campo en el rango de 3 a 10 °C por encima de la temperatura deseada en TT5 se consigue mantener V5 controlando en torno a su

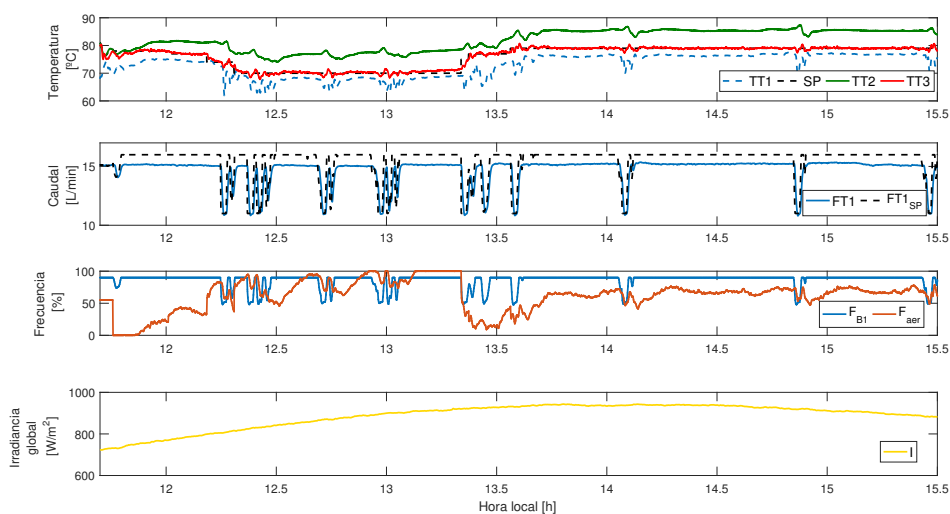


Figura 10: Prueba de control en la planta. Bucle de control 1 y 2. (1) Temperatura de entrada al campo solar ($TT1$), referencia para el bucle 1 y 2 (SP), salida del bucle 1 ($TT2$) y salida del bucle 2 ($TT3$), (2) caudal del campo ($FT1$) y referencia de caudal ($FT1_{SP}$), (3) frecuencia de funcionamiento de la B1 (F_{B1}) y del aerotermo (F_{aer}) y (4) irradiancia global (I).

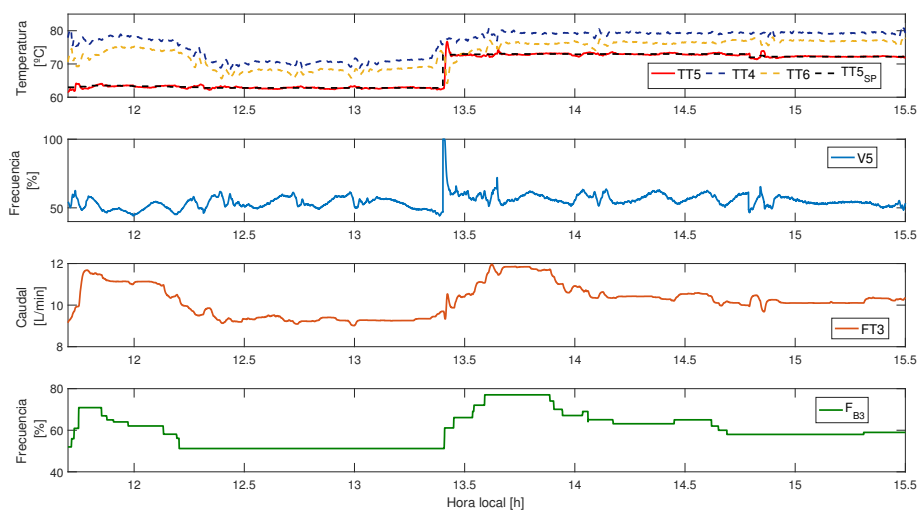


Figura 11: Prueba de control en la planta. Bucle de control 3 y 4. (1) Temperatura caliente de entrada al intercambiador ($TT5$), referencia ($TT5_{SP}$), temperatura caliente de salida del intercambiador ($TT6$) y perturbación al lazo de control ($TT4$), (2) apertura de V5, (3) caudal de entrada al intercambiador ($FT3$) y (4) frecuencia de funcionamiento de la B3.

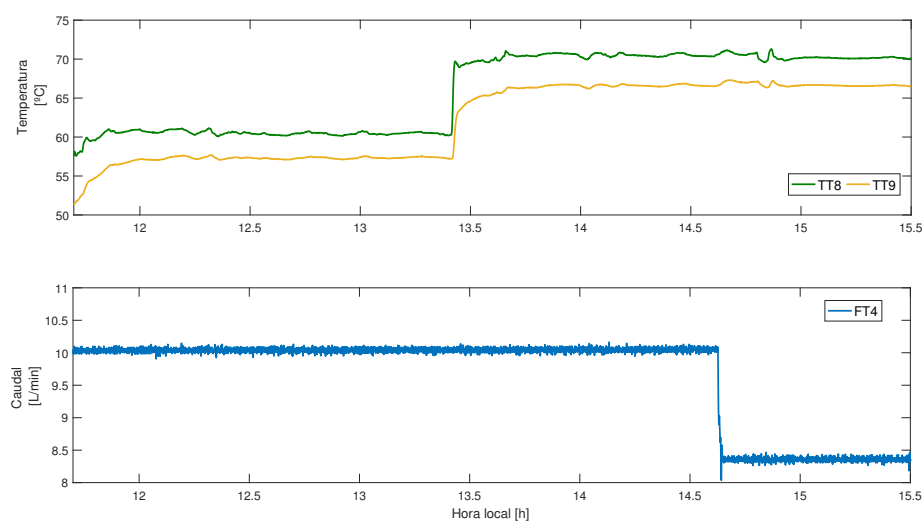


Figura 12: Temperaturas y caudal dentro del módulo. (1) Temperatura fría de entrada al intercambiador ($TT9$) y temperatura de salida del lado frío del intercambiador ($TT8$) y (2) caudal dentro del módulo MD ($FT4$).

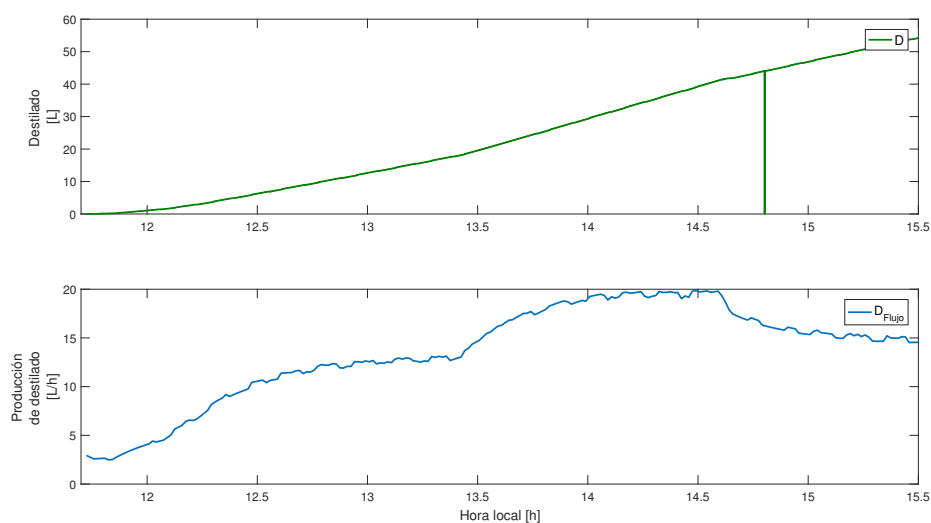


Figura 13: Producción de destilado. (1) Litros de destilado producidos a lo largo del ensayo (D) y (2) flujo de destilado (D_{Flujo}).

rango más lineal 40-70%. Este hecho es importante ya que se consigue un control mucho más eficaz y preciso con el bucle de control 3. También hay que hacer notar la actuación del aerotermo en es-

te ensayo. Aunque desde un principio el bucle de control del aerotermo estaba pensado para funcionar solo en los casos en los que el caudal del campo estuviera saturado, se decidió poner otra condición

con respecto a la diferencia de temperatura de salida del campo y la temperatura deseada. Así, en los momentos en los que el caudal del campo salga de saturación por el efecto del FF bien sea debido a perturbaciones provocadas por la irradiancia o por la temperatura de entrada del campo, el bucle de control 2 seguirá funcionando disipando la temperatura necesaria para alcanzar la referencia. Este hecho se puede comprobar en la Fig. 10 entre los instantes 12.20 y 13 h en los cuales el caudal del campo sale varias veces de saturación debido a perturbaciones en la temperatura de entrada del campo. En general, en este ensayo, el bucle de control 1 ha estado saturado debido principalmente a los altos valores de irradiancia, por lo que la temperatura de salida del campo se ha controlado casi en todo momento con el bucle 2.

En segundo lugar, en la Fig. 11 se puede comprobar la actuación del bucle de control 3. Como se ha mencionado anteriormente, en este bucle se mantiene una consigna en torno a 2.5 °C superior a la deseada dentro del módulo por lo que la consigna es 62.5 °C cuando se trabaja a 60°C dentro del módulo y 72.8 °C cuando se trabaja a 70 °C dentro del módulo. Como se puede apreciar en la figura, la válvula V5 se encuentra en todo momento controlando en torno a su zona lineal. Otro hecho importante se produce cuando se introduce el cambio de consigna, ya que hay una sobreoscilación en torno al 30 % en la temperatura TT5, debido a que cuando se abre la V5 al 100 % como consecuencia de la acción del FF del bucle de control, la temperatura que proviene del campo es mucho mayor a la deseada en TT5. Aunque se puede comprobar que esta sobreoscilación se contrarresta rápidamente y no influye en la temperatura de dentro del módulo TT8. Por último, se debe comentar que el bucle de control 4 estaba en modo manual en este ensayo y se operó teniendo en cuenta que este caudal no superara al caudal del campo FT1, para evitar la mezcla de fluidos en el sistema de distribución.

En cuanto a la producción de destilado Fig. 13, se puede comprobar cómo va aumentando respecto a la temperatura aunque no de forma directa, sino que cuando se establece una temperatura de operación dentro del módulo, la producción tarda en torno a 40 minutos en mantenerse en un valor constante. También se puede ver como se ve afectada con el caudal, ya que cuando se disminuye el caudal FT4, la producción disminuye por lo que pa-

rece indicar que a más caudal, mayor producción.

En base a esta forma de operación, surge la necesidad de desarrollar un sistema de control que genere las referencias adecuadas para la arquitectura de control directo en base a la temperatura deseada en TT8. Se debe hacer notar que todo el sistema es bastante sensible. El hecho de trabajar en modo directo sin un sistema de amortiguación (tanque) supone que una perturbación en la temperatura de entrada pueda aparecer de forma cíclica en el sistema. De este modo, en el modo directo es fundamental hacer una buena planificación del modo de arranque para evitar pequeñas oscilaciones como muestra este ejemplo de ensayo presentado.

6. Generador de consignas

Como se ha visto en la sección anterior, para la operación de la planta con el sistema de control directo, se van estableciendo diferencias de temperatura, ΔT , entre las temperaturas referencia de cada uno de los bucles de control, en base a la temperatura deseada dentro del módulo. Aunque la fórmula de operar es bastante eficaz, es necesario estar constantemente atento a la temperatura de entrada al módulo TT8 e ir cambiando la referencia de TT5 manualmente para tener la temperatura deseada en todo momento. Así, a veces se producen diferencias entre la temperatura deseada en TT8 y su valor real. Una forma más precisa de operación, consiste en utilizar el modelo desarrollado del intercambiador para generar consignas de forma automática. Haciendo uso del modelo del intercambiador en línea se puede calcular la diferencia de temperatura que debe haber entre la temperatura de entrada al intercambiador y la temperatura deseada en TT8.

De esta forma la idea general del generador de consignas se presenta en la Fig. 14. Como se puede apreciar, el bloque generador de consignas tendrá como entradas la información necesaria para calcular el modelo del intercambiador, representada en líneas discontinuas en la figura (TT5, TT9, FT3 y FT4) así como el valor deseado en TT8. Como variable de salida se obtendrá únicamente la referencia para el bucle de control 3, $TT5_{SP}$. La referencia para los bucles 1 y 2 será $TT5_{SP} + \Delta T$. Este ΔT debe encontrarse en el rango de 3 a 10 °C por encima de $TT5_{SP}$, como ha sido mencionado anteriormente, y puede ser modificado por el usua-

rio dependiendo de las condiciones de operación. Aunque a raíz de las diversas pruebas realizadas, se puede establecer un valor nominal de 4 °C.

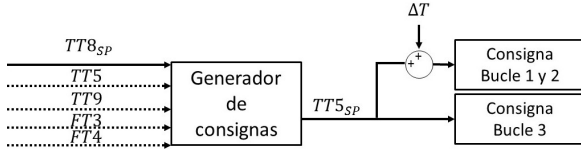


Figura 14: Esquema del generador de consignas.

En esta ocasión se ha decidido ir calculando la consigna de forma recursiva. El pseudocódigo del algoritmo de cálculo se presenta en la Fig. 15.

```

% Valores iniciales de las variables utilizadas
K ← 0,05;           % Parámetro incremental
TT8m ← TT8;       % Parámetro de salida del modelo del intercambiador
TT5SP-AC ← TT5;  % Variable que va acumulando las referencias para TT5

While (control == on) do
    if (abs(TT8SP - TT8m) > K) then
        if ((TT8SP - TT8m) < 0) then
            ΔT ← -K;
        else
            ΔT ← K;
        end
        TT5SP-AC = TT5SP + ΔT;
    end
end

% Evaluación del modelo
TT8m = intercambiador([TT5SP-AC TT9 FT3 FT4]);

% Referencias
TT5SP ← TT5SP-AC; % Referencia para el bucle 3
TT2SP ← TT5SP-AC + 4; % Referencia para los bucles 1 y 2
end While
    
```

Figura 15: Pseudocódigo del algoritmo generador de consignas.

Este algoritmo se ejecutará cada instante de muestreo, es decir cada segundo. Como el tiempo de muestreo es bastante más rápido que la dinámica de los principales sistemas de la planta, se puede ir actualizando la consigna cada segundo de forma que se obtengan cambios de consigna suaves y sin saltos para evitar grandes sobreoscilaciones. Así, se consigue una especie de filtro a la hora de hacer cambios de consignas de tipo escalón, como se apreciará en la prueba realizada en simulación.

De este modo, el algoritmo comienza con una fase de inicialización en la cual se fija un valor incremental K que se corresponde con el error mínimo que se tolerará entre la temperatura TT8 deseada

y la real. Además, se inicializan dos variables: i) $TT8_m$, que será la variable donde se irá guardando el valor de TT8 calculado mediante el modelo y ii) $TT5_{SP-AC}$, variable en la que se irá actualizando la consigna para TT5. Una vez inicializadas las variables auxiliares, se hace el cálculo de la consigna. En primer lugar, se comprueba si el valor absoluto de la diferencia entre el valor deseado a la entrada del módulo $TT8_{SP}$ y el valor calculado por el modelo $TT8_m$ con las condiciones reales de la planta es mayor que el incremento K fijado. Si se cumple esta condición, se pasa a comprobar si la diferencia es positiva o negativa, de forma que se le da el valor K o $-K$ a la variable ΔT . Una vez determinado el signo de la variable ΔT , se actualiza el valor de la variable $TT5_{SP-AC}$ que será el valor que ya tenía más el ΔT . A continuación, se hace uso de la función *intercambiador*. Esta función tiene implementado el modelo del intercambiador desarrollado en este trabajo y calculará el nuevo valor de $TT8_m$ con la referencia que se acaba de calcular $TT5_{SP-AC}$ y las condiciones de la planta en ese instante. Por último, hay una fase de asignación en la cual se le asigna a la referencia del bucle 3, $TT5_{SP}$, el valor de $TT5_{SP-AC}$ y a la referencia para los bucles 1 y 2, $TT2_{SP}$, el valor de $TT5_{SP-AC} + 4$ °C.

6.1. Prueba del generador de consigna en simulación

El generador de consignas ha sido probado en simulación, en un modelo de la planta desarrollado en Matlab. Este modelo está formado por todos los modelos desarrollados en los trabajos [10, 11], así como el modelo del intercambiador desarrollado en este trabajo. De este modo, se debe hacer uso de datos reales de irradiancia global y temperatura ambiente para simular el modelo el modelo, por lo que se han tomado datos reales de la instalación del día 1 de junio de 2016, representados en la Fig. 16. De este modo, se ha realizado un ensayo a las temperaturas de 60 y 70 °C dentro del módulo con un caudal FT4 de 500 L/h. Para este ensayo al parámetro K se le ha asignado el valor 0.1, por lo que 0.1 será el error mínimo que se obtiene entre la referencia y la temperatura real. Por otro lado, el ΔT entre la referencia para el bucle 3 y el bucle 1 ha sido de 4 °C, valor nominal establecido.

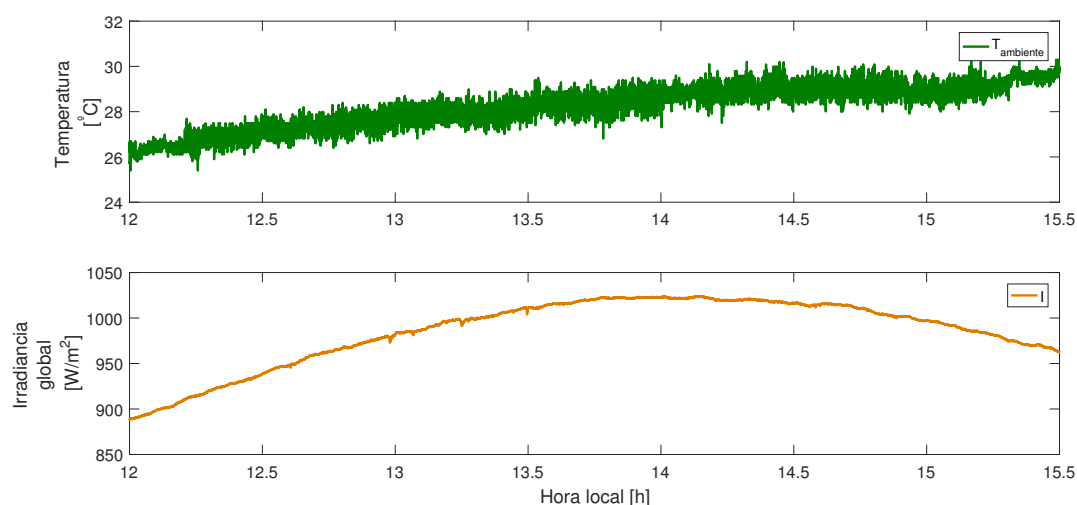


Figura 16: Datos reales usados para la simulación. (1) Temperatura ambiente ($T_{ambiente}$) y (2) irradiancia global (I).

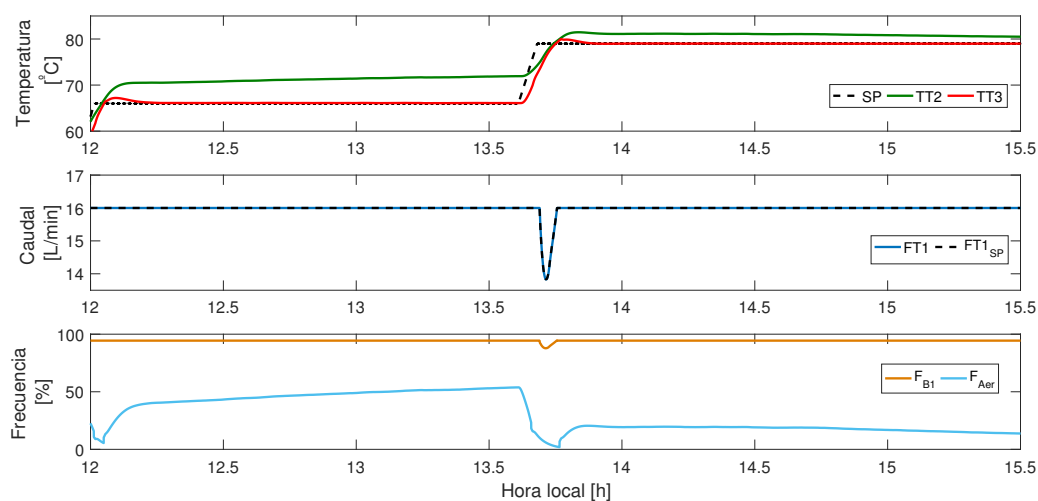


Figura 17: Prueba del generador de consignas en simulación. Bucles 1 y 2. (1) Referencia para el bucle 1 y 2 (SP), salida del bucle 1 ($TT2$) y salida del bucle 2 ($TT3$), (2) caudal del campo ($FT1$) y referencia de caudal ($FT1_{SP}$) y (3) frecuencia de funcionamiento de la B1 (F_{B1}) y del aerotermo (F_{aer}).

En las figuras Fig. 17, 18 y 19 se puede comprobar la evolución de cada uno de los bucles de control y la referencia dada por el generador de consignas. En primer lugar, se puede analizar la forma de actuación del generador de consignas. A partir del instante 13.61 h, cuando se introduce un

cambio de consigna en forma de escalón de 10 °C para llevar a la temperatura dentro del módulo a 70 °C, se puede comprobar que el generador de consignas empieza a aumentar la referencia para los bucles 1, 2 y 3 en forma de rampa hasta llegar a la temperatura deseada. Esta rampa se produce por

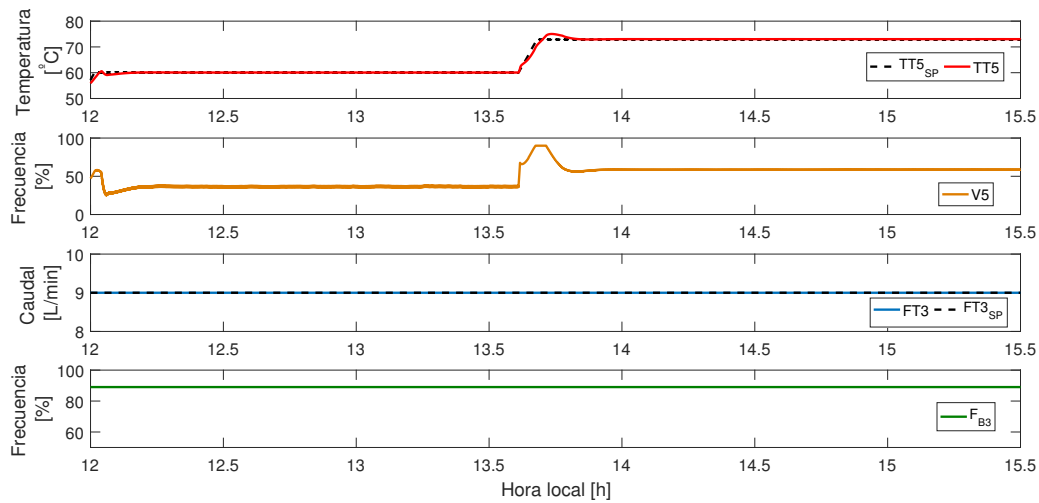


Figura 18: Prueba del generador de consignas en simulación. Bucles 3 y 4. (1) Temperatura caliente de entrada al intercambiador ($TT5$), referencia ($TT5_{SP}$), (2) apertura de $V5$, (3) caudal de entrada al intercambiador ($FT3$) y referencia ($FT3_{SP}$) y (4) frecuencia de funcionamiento de la B3.

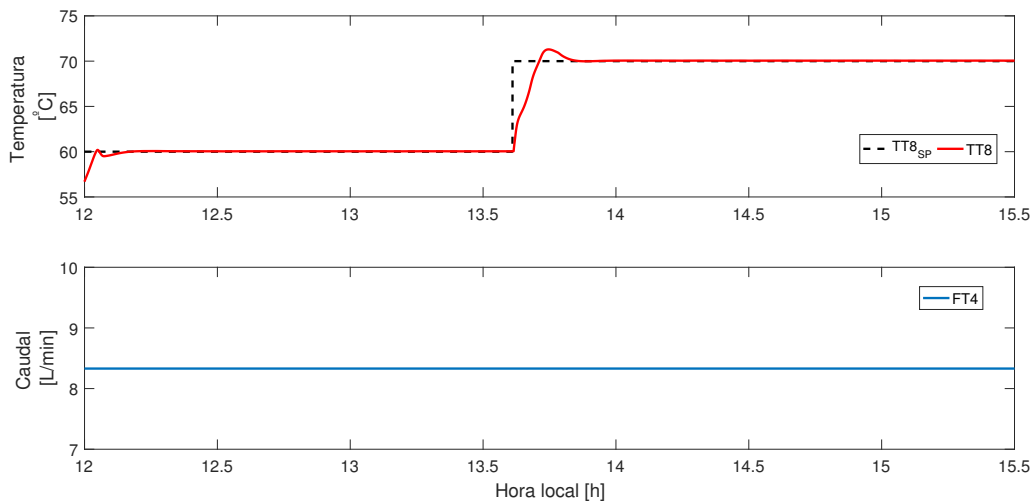


Figura 19: Prueba del generador de consignas en simulación. Caudal y temperatura dentro del módulo. Temperatura de salida del lado frío del intercambiador ($TT8$) y referencia ($TT8_{SP}$) y (2) caudal dentro del módulo MD ($FT4$).

la configuración del generador de consignas, ya que se va aumentando la consigna de forma incremental en cada instante de muestreo. Por consiguiente, se consigue una especie de filtro que evita la aparición de sobreoscilaciones grandes en los bucles de

control directo.

En la Fig. 17 se puede ver la salida de los bucles 1 y 2, en la cual el bucle de control del campo se encuentra saturado debido a las condiciones de operación y por tanto, se controla con el aeroter-

mo. En el instante 13.61 h, cuando se introduce el cambio de consigna dentro del módulo, el generador de consignas comienza a aumentar la consigna en forma de rampa hasta llegar a una referencia que permita operar a la temperatura deseada dentro del módulo. Durante el cambio de referencia se puede apreciar cómo el caudal del campo sale de saturación con el objetivo de alcanzar más rápidamente la referencia, aunque el aerotermo sigue funcionando debido a que la diferencia de temperatura entre la salida del campo TT2 y la referencia es mayor de 1 °C.

En la Fig. 18 está representada la evolución de los bucles de control 3 y 4. En este caso, se debe hacer notar que la V5 se encuentra controlando en su zona más lineal 40-70 % debido a que la temperatura del campo se mantiene 5 °C más alta que la deseada en TT5 por la acción del generador de consignas. De este modo, se consigue un control mucho más preciso a la entrada del intercambiador de calor. En cuanto al bucle de control 4, se mantiene fijo durante todo el ensayo en un valor de 9 L/min. Por último, en la Fig. 19 se puede observar como la temperatura TT8 tiene una sobreoscilación del 10 %, resultado bastante aceptable teniendo en cuenta la complejidad del sistema.

6.2. Prueba del generador de consigna en la instalación real

Una vez probado el sistema en simulación y comprobado su correcto funcionamiento, se pasó a la fase de prueba en la instalación real. Una de las pruebas se realizó el día 2 de septiembre de 2016 y se puede ver en las figuras Fig. 20, 21 y 22.

Para realizar una operación en la planta haciendo uso del generador de consignas, se debe seguir un procedimiento de arranque. En primer lugar, se debe llevar manualmente a la planta a un estado estable. Una vez llegado a este estado se satura al máximo el caudal del campo. En este punto se arranca el generador de consignas y el bucle de control 3. De este modo, se consigue estabilizar la temperatura de entrada al intercambiador así como la de entrada al campo. Cuando ambas temperaturas estén estabilizadas se arranca el bucle 1 y 2. Este procedimiento

debe ser seguido siempre ya que al tratarse de una planta piloto de pequeñas dimensiones y al operar sin sistema de amortiguación (tanque), todos los subsistemas que la conforman están acoplados y por tanto, si todos los controladores directos se enciende al mismo tiempo sin estar la planta en unas condiciones estables, el sistema de control tardará bastante tiempo en estabilizarse.

El generador de consignas se configura con un valor de 0.1 para el parámetro K , mientras que el valor del ΔT entre la referencia para el bucle 3 y el bucle 1 es de 4 °C. Así, el ensayo realizado consiste en una prueba a las temperaturas de 65 y 70 °C dentro del módulo. El ensayo comienza en el instante 11.84 h, los instantes anteriores corresponden con la fase manual de arranque. Por tanto, en el instante 11.84 h se pone como consigna 65 °C para TT8 y se arranca el bucle de control 3. Posteriormente, en el instante 12.15 se arrancan los bucles de control 1 y 2.

En la Fig. 22 se muestra la evolución de las temperaturas y del caudal dentro del módulo. Como se puede apreciar se comete un error de unos 0.3 °C con respecto a la referencia siendo el error máximo 0.9 °C. Se debe tener en cuenta que K tiene un valor de 0.1 y por tanto se asume que siempre habrá un error de 0.1 °C entre la consigna y la temperatura real, además se debe añadir también el error en el seguimiento de TT5. El resto de error es debido a la precisión del modelo. También se debe considerar que el generador de consignas ha sido configurado en bucle abierto, basándose únicamente en el modelo y no teniendo realimentación con la temperatura real. En cualquier caso, en la operación de la planta los operadores cuentan con un error de ± 1 °C en la temperatura de entrada al módulo, debido a las dificultades para estabilizar la temperatura manualmente. El sistema de control mantiene en todo momento la temperatura en ese rango e intenta que el error sea el mínimo fijado en el parámetro K . En el instante 12.57 h se introduce un cambio de consigna produciéndose una sobreoscilación en torno al 20 %. Esta sobreoscilación no es constante en todos los cambios de referencia y es provocada por las condiciones en la que se encuentre la planta en el momento del cambio. El tiempo de establecimiento en el cambio de consigna es de 8 minutos, bastante

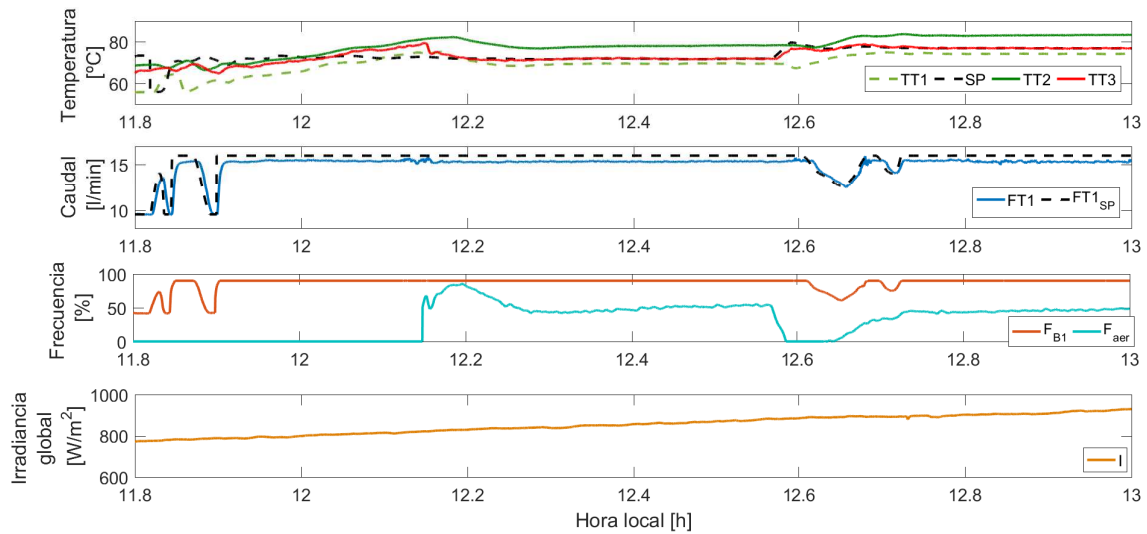


Figura 20: Prueba del generador de consignas en la instalación real. Bucle 1 y 2.(1) Temperatura de entrada al campo solar ($TT1$), referencia para el bucle 1 y 2 (SP), salida del bucle 1 ($TT2$) y salida del bucle 2 ($TT3$), (2) caudal del campo ($FT1$) y referencia de caudal ($FT1_{SP}$), (3) frecuencia de funcionamiento de la B1 (F_{B1}) y del aerotermo (F_{aer}) y (4) irradiancia global (I).

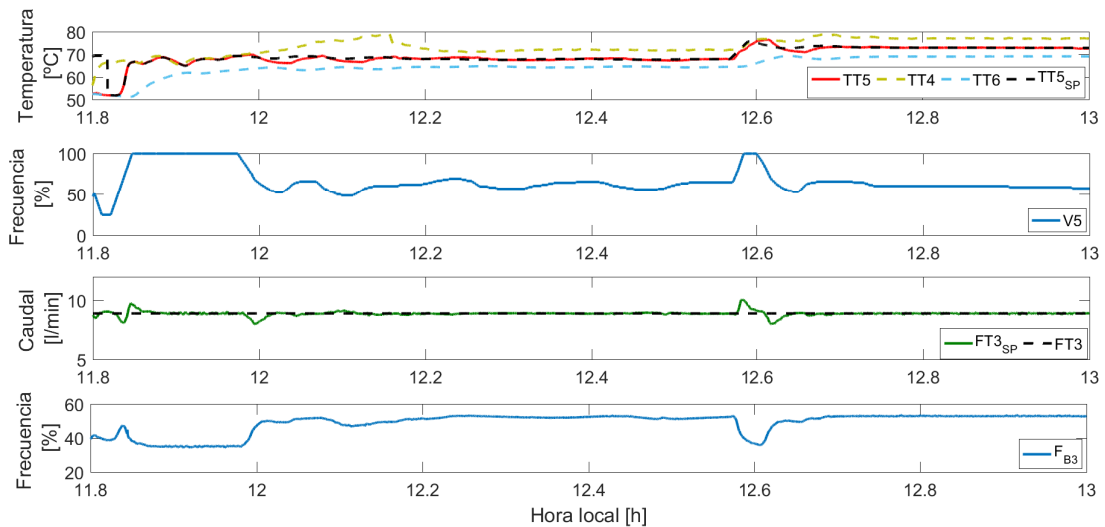


Figura 21: Prueba del generador de consignas en en la instalación real. Bucle 3 y 4.(1) Temperatura caliente de entrada al intercambiador ($TT5$), referencia ($TT5_{SP}$), temperatura caliente de salida del intercambiador ($TT6$) y perturbación al lazo de control ($TT4$), (2) apertura de V5, (3) caudal de entrada al intercambiador ($FT3$) y referencia ($FT3_{SP}$) y (4) frecuencia de funcionamiento de la B3.

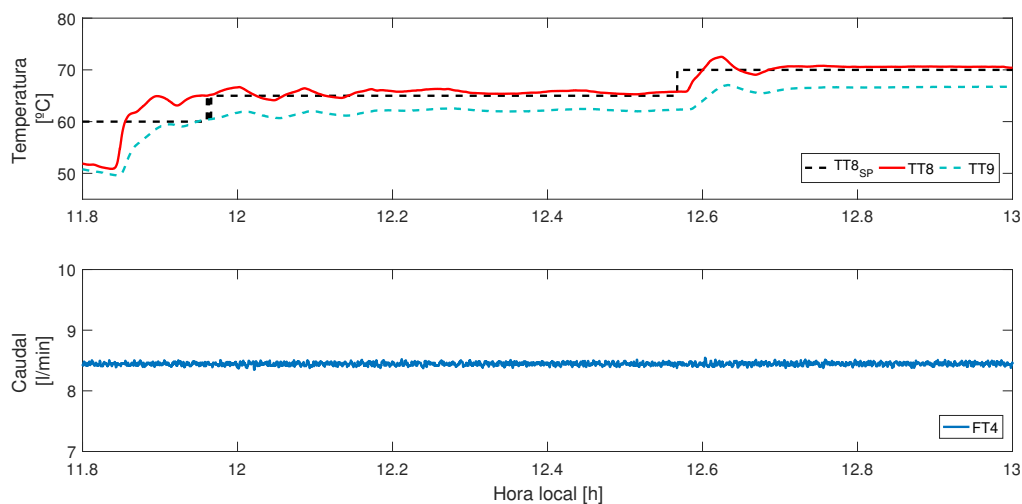


Figura 22: Prueba del generador de consignas en la instalación real. Caudal y temperaturas dentro del módulo. Temperatura fría de entrada al intercambiador ($TT9$), temperatura de salida del lado frío del intercambiador ($TT8$) y referencia ($TT8_{SP}$) y (2) caudal dentro del módulo MD ($FT4$).

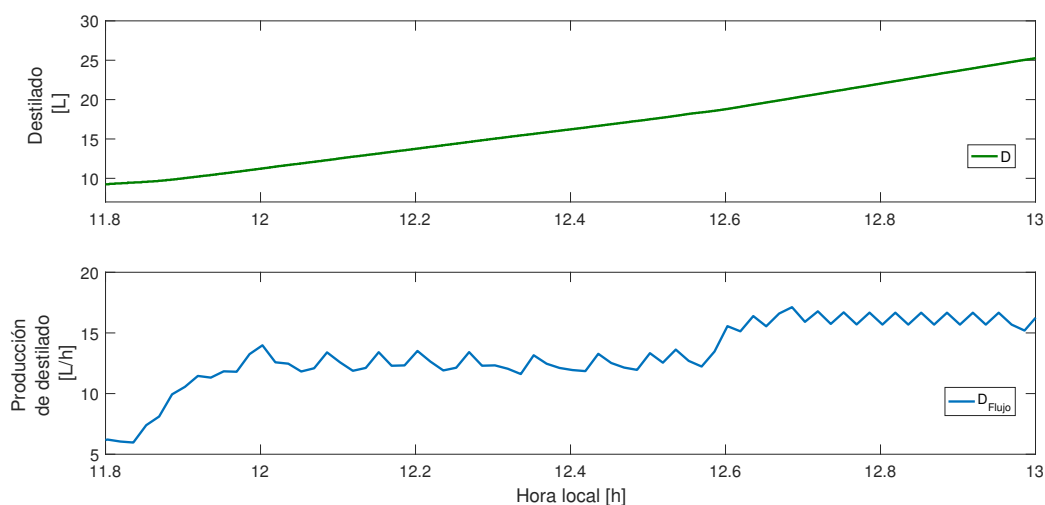


Figura 23: Producción de destilado. (1) Litros de destilado producidos a lo largo del ensayo (D) y (2) flujo de destilado (D_{Flujo}).

más rápido que la operación manual en la cual se emplean entre 20 y 40 minutos en realizar un cambio de consigna similar al realizado en este test.

En cuanto a la actuación del sistema de control directo, en la Fig. 20 se puede ver la evolución del

bucle 1 y 2. En primer lugar, se puede apreciar lo comentado anteriormente en la fase de arranque. Al inicio se satura el caudal del campo manualmente y una vez la temperatura de entrada al campo no tiene oscilaciones, se arranca el sistema de control en el instante 12.15 h. En ese momento, la B1 se

satura y se comienza a controlar con el aerotermo. En el instante 12.57 h, cuando se produce el cambio de consigna, el caudal del campo FT1 sale de saturación y aunque no se vuelve a saturar hasta el instante 12.73 h, el aero se enciende en el instante 12.64 h ya que la diferencia entre la temperatura de salida del campo y la referencia es mayor de 1 °C. La referencia es en todo momento 4 °C superior a la referencia del bucle de control 3 y su evolución se comentará a continuación.

En la Fig. 21 se puede ver la actuación de los bucles de control 3 y 4. El bucle de control 4 está arrancado en todo momento, mientras que el bucle 3 se pone en marcha en el instante 11.82 de forma que el sistema de control va siguiendo la consigna enviada por el generador de consigna de forma correcta. Como se puede comprobar la consigna generada es en todo momento suave, sin grandes saltos. Esto es debido a la configuración del generador, de modo que cuando se produce el cambio de consigna en forma de escalón en TT8, el generador de consignas actúa como una especie de filtro. De esta forma, el cambio en escalón se transforma en una rampa, evitando así grandes sobreoscilaciones en los bucles de control directo que se deben evitar cuando se opera en modo directo ya que se propagan al circuito completo. Una vez llegado a una referencia estacionaria, se puede comprobar como la válvula controla en torno a su rango de operación más lineal 40-70%. De este modo, aunque los dos bucles de control a la salida del campo se encuentre en saturación, se obtiene un control bastante preciso a la entrada del intercambiador. Por último, comentar que el bucle de control 4 se ve afectado por las variaciones de la V5. De este modo en la Fig. 21 se puede comprobar que cuando hay variaciones grandes en la apertura de la V5, el caudal varía. Aunque estas variaciones son corregidas rápidamente por el controlador.

En cuanto a la producción de destilado Fig. 23 se puede observar un comportamiento similar al ensayo mostrado en la sección 5. De este modo, se puede sacar una conclusión y es que a mayor temperatura de operación, mayor producción de destilado se obtiene.

Finalmente, se puede concluir que la actuación

del generador de consignas en la prueba real ha cumplido con lo esperado según las pruebas realizadas en simulación. Por consiguiente, se consigue un sistema de control bastante eficaz para la operación de la planta que permite trabajar en unas condiciones estacionarias gracias a los diferentes sistemas de rechazo a perturbaciones que lleva integrado. Además, se consigue mejorar notablemente los tiempos de establecimiento de la operación manual.

7. Conclusiones y trabajos futuros

Con el desarrollo de este trabajo se ha demostrado la funcionalidad y viabilidad de la utilización de una arquitectura de control completa para una planta de destilación por membranas alimentada con energía solar. De esta forma, se ha conseguido obtener unas condiciones adecuadas de operación a la entrada del módulo MD con dos ventajas principales respecto a la operación manual:

1. Se consigue un fuerte rechazo a las perturbaciones provocadas por la radiación y por el acoplamiento de los diferentes subsistemas que componen la planta. De esta forma, se facilita considerablemente la operación manual y además se opera de una forma más eficiente la planta, reduciendo el uso de elementos no basados en energías renovables.
2. Se consigue mejorar los tiempos de establecimiento de la operación manual. Mientras que manualmente se tarda en torno a 20-40 minutos para llevar al sistema a la temperatura deseada de operación, gracias al sistema generador de consignas y al sistema de control directo de la planta, este tiempo es reducido a más de la mitad como se ha podido mostrar en el ensayo presentado.

Aunque se ha dotado a la planta de un sistema de control bastante completo, aun queda mucho por avanzar. Los trabajos futuros que se contemplan estarán dirigidos a seguir mejorando la arquitectura de control y a implementar nuevas estrategias de control que permitan aumentar la eficiencia y viabilidad de la operación de la planta. De esta forma se plantean los siguientes trabajos:

1. Desarrollar modelos del módulo MD (basado en primeros principios y/o en datos experimentales), así como un lazo de control en el caudal de alimentación de agua salada para poder controlar la producción de destilado.
2. Continuar mejorando los modelos y la estrategia de control planteada en este trabajo con el fin de los tiempos de establecimiento.
3. Extender el sistema de control completo a los diferentes modos de operación de la planta a través de un esquema de control predictivo multivariables basado en descripciones MLD (*Mixed Logical Dynamics*).
4. Implementar estrategias de control jerárquicas para la optimización de consignas atendiendo a diferentes criterios como son la maximización de la producción de destilado o de la eficiencia térmica y la reducción los costes de operación.

Referencias

- [1] 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.
- [2] A. Ruiz-Aguirre, D.-C. Alarcón-Padilla, and G. Zaragoza, "Productivity analysis of two spiral-wound membrane distillation prototypes coupled with solar energy," *Desalination and Water Treatment*, vol. 55, no. 10, pp. 2777–2785, 2015.
- [3] M. R. Qtaishat and F. Banat, "Desalination by solar powered membrane distillation systems," *Desalination*, vol. 308, pp. 186–197, 2013.
- [4] N. Ghaffour, S. Lattemann, T. Missimer, K. C. Ng, S. Sinha, and G. Amy, "Renewable energy-driven innovative energy-efficient desalination technologies," *Applied Energy*, vol. 136, pp. 1155–1165, 2014.
- [5] A. Cipollina, M. Di Sparti, A. Tamburini, and G. Micale, "Development of a membrane distillation module for solar energy seawater desalination," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 90, no. 12, pp. 2101–2121, 2012.
- [6] 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.
- [7] 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, no. 1, pp. 386–396, 2011.
- [8] E. Guillén-Burrieza, G. Zaragoza, S. Miralles-Cuevas, and J. Blanco, "Experimental evaluation of two pilot-scale membrane distillation modules used for solar desalination," *Journal of Membrane Science*, vol. 409, pp. 264–275, 2012.
- [9] J. D. Gil, A. Ruiz-Aguirre, L. Roca, G. Zaragoza, and M. Berenguel, "Solar membrane distillation: A control perspective," in *23th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2015)*. IEEE, 2015, pp. 796–802.
- [10] J. D. Gil, A. Ruiz-Aguirre, L. Roca, G. Zaragoza, M. Berenguel, and J. L. Guzmán, "Control de plantas de destilación por membranas con apoyo de energía solar—parte 1: Esquemas," in *XXXVI Jornadas Automática, Bilbao, España*, 2015.
- [11] —, "Control de plantas de destilación por membranas con apoyo de energía solar—parte 2: Resultados," in *XXXVI Jornadas Automática, Bilbao, España*, 2015.
- [12] 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, no. 12, pp. 2714–2722, 2010.
- [13] 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.
- [14] J.-S. Lin, H. Chang, and G. Wang, "Modelling and control of the solar powered membrane distillation system," in *AIChE annual meeting*, 2011.

- [15] F. Eleiwi, I. N'Doye, and T.-M. Laleg-Kirati, "Feedback control for distributed heat transfer mechanisms in direct-contact membrane distillation system," in *2015 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*. IEEE, 2015, pp. 1624–1629.
- [16] A. Alkudhiri, N. Darwish, and N. Hilal, "Membrane distillation: a comprehensive review," *Desalination*, vol. 287, pp. 2–18, 2012.
- [17] A. de la Calle, L. Roca, J. Bonilla, and S. Dormido, "Modelado y simulación dinámica de procesos termoquímicos en instalaciones termosolares." Ph.D. dissertation, Documentos CIEMAT, 2015.

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de un generador de consignas automático para una planta piloto de destilación por membranas alimentada con energía solar, situada en la Plataforma Solar de Almería (PSA), perteneciente al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). El generador de consignas permite fijar unas condiciones de operación adecuadas de temperatura a la entrada del sistema de destilación, actuando sobre el sistema de control directo ya implementado en la planta. De este modo, se consigue mejorar notablemente la automatización de operación de la planta, así como la eficiencia de la misma. En primer lugar, se presentan estudios en simulación para analizar las prestaciones del sistema. Posteriormente, se muestran los resultados reales de la aplicación de esta técnica en la instalación de destilación por membranas.

Abstract

This work presents the development of a reference governor for a pilot membrane distillation facility powered with solar energy located at PSA, a dependency of CIEMAT. The reference governor allows to fix a suitable operating temperature at the inlet of the distillation system, which is maintained with the direct control system already implemented on the plant. Thus, it is possible to improve operation quality by automation. First, simulation tests are presented in order to analyze the system performance. Secondly, real experimental tests of this technique at the real facility are shown.

