

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

“Estrategias de control aplicadas a una
planta piloto de destilación por membranas
alimentada con energía solar”

Curso 2014/2015

Alumno/a:

Juan Diego Gil Vergel

Director/es:

Dr.D. Manuel Berenguel Soria
Dra.Dña. Lidia Roca Sobrino





Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer al profesor Manuel Berenguel Soria por la gran dedicación y ayuda prestada para la realización de este trabajo y por saber transmitir la pasión que tiene por el control y la automática desde las primeras asignaturas que cursamos en este área de conocimiento hasta la realización de este trabajo.

Quisiera agradecer a Lidia Roca Sobrino por todo el tiempo y el esfuerzo dedicado para el desarrollo de este trabajo y porque sin ella esto no hubiera sido posible.

Por último, agradezco el apoyo a toda mi familia, amigos y compañeros de clase con los cuales he podido vivir experiencias únicas en estos cuatro años.





Contenido

Agradecimientos	1
Lista de figuras	7
Lista de tablas	9
Nomenclatura	11
Acrónimos.....	11
Variables y parámetros de la instalación	12
Funciones y variables de los bucles de control.....	13
Capítulo 1: Motivación y objetivos.....	16
1.1 Motivación del proyecto.....	16
1.2 Contexto y situación actual.....	17
1.3 Objetivos.....	19
1.4 Fases de desarrollo.....	19
1.5 Resumen de resultados	20
Capítulo 2: Revisión bibliográfica	22
2.1 Tipos de procesos de desalación.....	22
2.1.1 Destilación súbita por efecto flash (MSF)	22
2.1.2 Destilación por múltiple efecto (MED)	23
2.1.3 Compresión térmica de vapor (TVC).....	23
2.1.4 Destilación solar	23
2.1.5 Congelación	23
2.1.6 Formación de hidratos.....	24
2.1.7 Destilación por membranas	24
2.1.8 Compresión mecánica de vapor (CV).....	24
2.1.9 Ósmosis inversa.....	24
2.1.9 Electrodiálisis.....	25
2.1.10 Intercambio iónico.....	25
2.2 Proceso de destilación MD	25
2.2.1 Destilación por contacto directo (DCMD).....	26
2.2.2 Destilación por membrana con espacio de aire (AGMD).....	26
2.2.3 Destilación por membrana con barrido de gas (SGMD)	26
2.2.4 Destilación por membrana líquida (LGMD)	26
2.2.5 Destilación en condiciones de vacío (VMD).....	26

2.3 Eficiencia en el uso de la energía solar térmica para la planta piloto de destilación por membranas MD	27
2.4 Sistemas de control para plantas de destilación por membranas MD.....	29
2.5 Estrategias de control para el campo solar	30
2.6 Naturaleza híbrida de la planta.....	31
Capítulo 3: Materiales y métodos	32
3.1 Descripción de la planta piloto de destilación por membranas	32
3.2 Material empleado.....	34
3.2.1 <i>Matlab</i>	34
3.2.2 <i>LabVIEW</i>	35
3.3 Metodología.....	36
3.3.1 Análisis de sistemas dinámicos en lazo abierto.....	36
3.3.2 Modelado de sistemas.....	38
3.3.2.1 Modelos basados en datos experimentales. Identificación por mínimos cuadrados	39
3.3.2.2 Modelado físico basado en primeros principios.....	40
3.3.3 Control PID	42
3.3.3.1 Acción proporcional.....	42
3.3.3.2 Acción integral.....	42
3.3.3.3 Acción derivativa	43
3.3.3.4 Sintonía de los controladores.....	43
3.3.3.5 Mecanismo <i>anti-windup</i>	45
3.3.4 Control en cascada	46
3.3.5 Predictor de Smith.....	47
3.3.6 Control por adelanto	48
3.3.7 Filtrado de señales.....	49
Capítulo 4: Resultado y discusiones	51
4.1 Análisis de la operación manual de la planta.....	51
4.2 Identificación de los modos de operación.....	53
4.3 Modelado dinámico del sistema.....	57
4.3.1 Modelado del campo solar	57
4.3.1.1 Modelo del campo solar.....	57
4.3.1.2 Modelo lineal de la temperatura de salida del campo T2.....	59
4.3.1.3 Modelo del caudal de entrada al campo Q1	61

4.3.2 Modelado del sistema aero-válvula.....	62
4.3.2.1 Modelado de V1	62
4.3.2.2 Modelado del aerotermo	64
4.3.3 Modelado de las variables de entrada al módulo MD.....	65
4.3.3.1 Modelado del caudal de entrada al módulo MD Q3	65
4.3.3.2 Modelado de la temperatura de entrada al módulo MD T10.....	67
4.4 Esquemas de control en simulación.....	68
4.4.1 Bucle 1: Control de la temperatura de salida del campo solar	69
4.4.2 Bucle 2: Control de la temperatura de mezcla aero-campo solar.....	71
4.4.3 Bucle 3: Control de caudal y temperatura a la entrada del módulo	76
4.5 Prueba de los esquemas de control en la planta piloto	78
4.5.1 Resultados para el bucle 1	79
4.5.2 Resultados para el bucle 2	81
4.5.3 Resultados para el bucle 3	85
Capítulo 5: Conclusiones y futuros trabajos	89
5.1 Conclusiones	89
5.2 Trabajos futuros	90
5.3 Publicaciones	91
Capítulo 6: Bibliografía.....	93



Lista de figuras

Figura 1.1. Capacidad de las instalaciones desalinizadoras por países [37].	17
Figura 2.1. Diferentes configuraciones MD [36].	27
Figura 2.2. Planta piloto de destilación MD situada en la Plataforma Solar de Almería.	28
Figura 2.3. Diagrama esquemático del campo.	30
Figura 3.1. Diagrama esquemático de la planta: (SOLAR FIELD: campo solar, AIR COOLER: aerotermo, STORAGE TANK: tanque de almacenamiento, DISTRIBUTION SYSTEM: sistema hidráulico de distribución, HEAT EXCHANGER: Intercambiador de calor, MD MODULE: módulo MD, BRINE: salmuera, FEED TANK: tanque de alimentación, DISTILLATE TANK: tanque de destilado, CHILLER: enfriadora.	33
Figura 3.2. Escalón unitario.	37
Figura 3.3. Curvas de respuesta a escalón unitario de sistema de segundo orden con diferente valor de ξ [27].	39
Figura 3.4. Esquema de la válvula a tres vías V5.	40
Figura 3.5. Diagrama de bloques de un lazo de realimentación simple [5].	42
Figura 3.6. Controlador PID con mecanismo <i>anti-windup</i> [5].	46
Figura 3.7. Esquema de control en cascada para el campo solar.	46
Figura 3.8. Diagrama de bloques de un predictor de Smith [5].	47
Figura 3.9. Diagrama de bloques de un predictor de Smith con filtro en la realimentación [26].	48
Figura 3.10. Diagrama de bloques del control del campo solar con control por adelanto.	48
Figura 3.11. Diagrama de bloques sin control por adelanto (izquierda) y con control por adelanto (derecha) [5].	49
Figura 3.12. Filtrado de la señal temperatura ambiente.	50
Figura 4.1. Operación manual. Apertura de válvula 1, aerotermo y temperaturas.	52
Figura 4.2. Operación manual. Irradiancia y caudales.	52
Figura 4.3. Diagrama esquemático de la instalación con las posiciones de las válvulas.	54
Figura 4.4. Datos de entrada para el modelo de caja negra del campo.	58
Figura 4.5. Parámetros para el modelo (Q: caudal, Irrad=I: irradiancia, Ta: temperatura ambiente, Tin=T1: temperatura de entrada, ToF=T2: temperatura de salida).	58
Figura 4.6. Comparación entre la temperatura de salida del modelo y la medida en el campo solar.	59
Figura 4.7. Ensayo para identificación del modelo para T2.	60
Figura 4.8. Respuesta a escalón unitario de los modelos obtenidos para T2.	60
Figura 4.9. Ensayo para la identificación del modelo para Q1.	61
Figura 4.10. Respuestas a escalón unitario de los modelos obtenidos para Q1.	61
Figura 4.11. Ensayo en lazo abierto para el modelado de V1 y aerotermo.	63
Figura 4.12. Respuesta ante escalón unitario de los modelos de V1.	64
Figura 4.13. Respuesta ante escalón unitario de los modelos del aero.	65
Figura 4.14. Ensayo en lazo abierto para la caracterización de Q3.	66
Figura 4.15. Respuesta a escalón unitario de los modelos caracterizados.	66
Figura 4.16. Ensayo en lazo abierto para la caracterización de T10.	67
Figura 4.17. Respuesta a escalón unitario de los modelos para T10.	67

Figura 4.18. Diagrama esquemático de la instalación con los lazos de control.	68
Figura 4.19. Esquema de control del bucle 1. Temperatura de salida del campo.	69
Figura 4.20. Respuesta en lazo cerrado PI esclavo.	70
Figura 4.21. Respuesta en lazo cerrado PI maestro.	71
Figura 4.22. Esquema de control del bucle 2. Temperatura de mezcla aero-campo solar.....	72
Figura 4.23. Lugar de las raíces del modelo de V1.	74
Figura 4.24. Respuesta en lazo cerrado del esquema de control sin control por adelanto.	74
Figura 4.25. Respuesta en lazo cerrado del esquema de control con control por adelanto.	75
Figura 4.26. Respuestas en lazo cerrado del PID para el control de Q3.	77
Figura 4.27. Esquema de control del bucle 3- temperatura de entrada al módulo T10.	77
Figura 4.28. Respuestas en lazo cerrado del PI para el control de T10.	78
Figura 4.29. Control del campo solar: (1) irradiancia global (I), (2) temperaturas de referencia (T2ref), entrada (T1) y salida (T2), (3) caudal (Q1), (4) caudal demandado por el controlador por realimentación (Q1c) y (5) caudal demandado por el controlador FF (Q1FF).....	80
Figura 4.30. Resultados bucle 2-Prueba 1: (1) temperatura de referencia (T_{4ref}), salida (T4), (2) diferencias de temperaturas ($T2-T_{4REF}$), diferencia de temperatura ($T2-T4$), (3) apertura de la válvula V1, frecuencia de funcionamiento aero.	82
Figura 4.31. Perturbaciones al bucle 2-Prueba 1: (1) temperatura de entrada (T2), (2) caudal Q1, (3) irradiancia (I).	82
Figura 4.32. Resultados bucle 2-Prueba 2: (1) temperatura de referencia (T_{4ref}), salida (T4), (2) diferencias de temperaturas ($T2-T_{4REF}$), diferencia de temperatura ($T2-T4$), (3) apertura de la válvula V1, frecuencia de funcionamiento aero.	84
Figura 4.33. Perturbaciones al bucle 2-Prueba 2: (1) temperatura de entrada (T2), (2) caudal Q1, (3) irradiancia (I).	84
Figura 4.34. Intercambiador de calor del módulo MD: (1) temperaturas de referencia (T10ref), entrada (T8, T11) y salida (T10), (2) apertura de la válvula (V5), (3), caudal de la bomba (Q3) y referencia (Q3ref), (4) frecuencia de la bomba (f_{B3}).	86



Lista de tablas

Tabla 1.1. Tareas realizadas y tiempo estimado dedicado a cada una de ellas.	20
Tabla 2.1. Métodos de desalación existentes en el mercado [24].	22
Tabla 4.1. Modos de operación de la planta.	55
Tabla 4.2. Comparativa de resultados con simulación-bucle 1.	80
Tabla 4.3. Comparativa de resultados con la operación manual-bucle 1.	81
Tabla 4.4. Comparativa de resultados con simulación-bucle 2.	83
Tabla 4.5. Comparativa de resultados con simulación-bucle 3.	86
Tabla 4.6. Comparativa de resultados con simulación, escalones positivos-bucle 3.	87
Tabla 4.7. Comparativa de resultados con simulación, escalones negativos-bucle 3.	87



Nomenclatura

Acrónimos

Acrónimo	Definición
AGMD	<i>Air Gap Membrane Distillation</i> Destilación por membrana con espacio de aire
B1	Bomba del cambo solar
B2	Bomba de distribución del tanque
B3	Bomba de entrada al intercambiador del módulo MD
C	Control realimentado
CV	Compresión mecánica de vapor
DCMD	<i>Direct Contact Membrane Distillation</i> Destilación por contacto directo
ED	Electrodialisis
FF	<i>Feedforward</i> Control por adelanto
LGMD	<i>Liquid Gap Membrane Distillation</i> Destilación por membrana líquida
MD	<i>Membrane Distillation</i> Destilación por membranas
MED	<i>Multi-Effect Distillation</i> Destilación multi-efecto
PI	Controlador proporcional-integral
PID	Controlador proporcional-integral-derivativo
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> Controlador lógico programable
PSA	Plataforma Solar de Almería
KSA	<i>Kingdom of Saudi Arabia</i> Reino de Arabia Saudí
sp	<i>Setpoint</i>
ref	Referencia
RO	<i>Reverse Osmosis</i> Ósmosis inversa
ROW	<i>Rest of the world</i> Resto del mundo
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i> Sistema de supervisión, adquisición de datos y control
SGMD	<i>Sweeping Gas Membrane Distillation</i> Destilación con membranas con barrido de gas
TVC	<i>Thermal Vapour Compression</i> Desalación por compresión térmica de vapor
UAE	<i>United Arab Emirates</i> Emiratos Árabes
VMD	<i>Vacuum Membrane Distillation</i> Destilación en condiciones de vacío
V1	Válvula 1
V5	Válvula 5

Variables y parámetros de la instalación

Variable	Descripción	Unidades
c_f	Factor de conversión (número de módulos, conexiones y conversión a l/min)	$9 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 10^4$
c_p	Capacidad calorífica del agua	4190 J/kg/°C
H	Coeficiente global de pérdidas térmicas	4.7 J/s/K
h	Entalpía	J
I	Irradiancia global	W/m ²
\dot{m}	Flujo másico	kg/s
n_{cs}	Número de conexiones en serie	5
L_a	Longitud del tubo que modela el colector solar	1.95 m
L_{eq}	Longitud equivalente del tubo que modela el colector solar	
Q1	Caudal del campo solar	l/min
Q2	Caudal de distribución del tanque de almacenamiento	l/min
Q3	Caudal de entrada del intercambiador 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 entre la salida del campo solar y la salida del aerotermo	°C
T8	Temperatura a la entrada del sistema de distribución	°C
T10	Temperatura a la entrada del intercambiador del módulo MD	°C
T11	Temperatura de salida del intercambiador del módulo MD	°C
β	Parámetro que modula la irradiancia que afecta al campo solar	0.123 m
ρ	Densidad del agua	975 kg/m ³

Funciones y variables de los bucles de control

Variable/función	Descripción
$C(s)$	Función de transferencia del controlador
$e(t), E(s)$	Error de seguimiento
$F(s)$	Función de transferencia del filtro en la referencia
$F_{ff}(s)$	Función de transferencia del controlador por adelanto
$G(s)$	Función de transferencia del sistema
k	Tiempo discreto
K	Ganancia estática del sistema
K_p	Ganancia proporcional de controladores PID
m	Modelo
$m(k)$	Vector regresor
$n(t), N(s)$	Ruido
$P(s)$	Función de transferencia que relaciona la perturbación
$r(t), R(s)$	Referencia
$s = \sigma + j\omega$	Variable compleja de la transformada de Laplace
t	Tiempo continuo
T	Constante de tiempo de filtros paso bajo
T_d	Tiempo derivativo de controladores PID
T_i	Tiempo integral de controladores PID
t_r	Tiempo de retardo
T_t	Constante de tiempo de <i>tracking</i> del mecanismo <i>anti-windup</i>
$u(t), U(s)$	Señal de control
$y(t), Y(s)$	Salida del sistema
$d(t), D(s)$	Perturbación
α	Fracción de flujo másico
θ	Vector de parámetros estimados
τ	Constante de tiempo del sistema





Capítulo 1: Motivación y objetivos

Este capítulo trata sobre la situación actual de las plantas de desalación, haciendo especial énfasis en la tecnología de destilación por membranas (MD, *Membrane Distillation*). Además se expone la motivación y objetivos del trabajo fin de grado y se presenta un breve resumen de los resultados obtenidos.

1.1 Motivación del proyecto

En la actualidad, la escasez de agua para el consumo humano es uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la humanidad. El rápido crecimiento de la población mundial, de la industria y de las actividades agrícolas ha ocasionado una demanda altísima de agua potable, sobrepasando los límites de renovación de dicho recurso, pero no solo en la cantidad, sino también en la calidad suficiente para satisfacer las necesidades humanas.

A pesar de que dos tercios del planeta están cubiertos por agua, el 99.3% del total es demasiado salada (agua de mar) o inaccesible (capas de hielo y acuíferos). Así, el agua pura en estado líquido, prácticamente no se encuentra en la naturaleza y lo que se denomina agua en realidad es una disolución de diversas sales en agua. El agua es potable si contiene menos de 0.5 gramos de sal por litro, en este contexto es donde la desalación de agua de mar puede ser una alternativa muy atractiva y viable para la solución del problema de la escasez de agua.

La demanda de tecnologías de desalación se ha incrementado rápidamente, sobre todo en determinadas regiones situadas en Oriente Medio, las cuales sufren grandes períodos de sequía que producen una gran escasez de aguas superficiales aptas para el consumo humano, pero que simultáneamente disponen de agua de mar en abundancia. Dichas zonas demandan plantas de desalación de tamaño medio, autónomas y robustas para establecer un suministro independiente de agua potable.

El proceso de desalación requiere una cantidad considerable de energía, por lo que suele estar asociado al uso de energías renovables. La coincidencia geográfica entre la escasez de agua y la alta radiación solar, hace de la energía solar la tecnología más apropiada y eficiente para alimentar las plantas de desalación, sustituyendo así las fuentes tradicionales de suministro de energía como son la quema de combustibles fósiles y la electricidad.

1.2 Contexto y situación actual

A día de hoy, el método de desalinización es utilizado en unos 150 países, siendo los países de oriente medio los que más capacidad instalada tiene (Fig. 1.1), pero se prevé que algunos países dupliquen pronto su capacidad, como: Sudáfrica, Jordania, México, Libia, Chile, India y China.

Entre 1995 y 2007, el mercado de la desalinización aumento un 600%. En 2010 se explotaban unas 14.450 plantas desalinizadoras, pero se espera que el crecimiento siga siendo exponencial en los próximos años con la previsión de doblar la capacidad desalinizadora para 2025 [23]. Este crecimiento tan alto se debe a apuestas gubernamentales en este tipo de tecnología, como es el caso de Abu Dhabi, donde la Agencia de Medio Ambiente del Emirato ha presentado un plan, recogido en La Estrategia de Gestión Hídrica, donde se pretende que las energías limpias generen el 100% de la energía para cubrir todas las necesidades de desalinización en 2030.

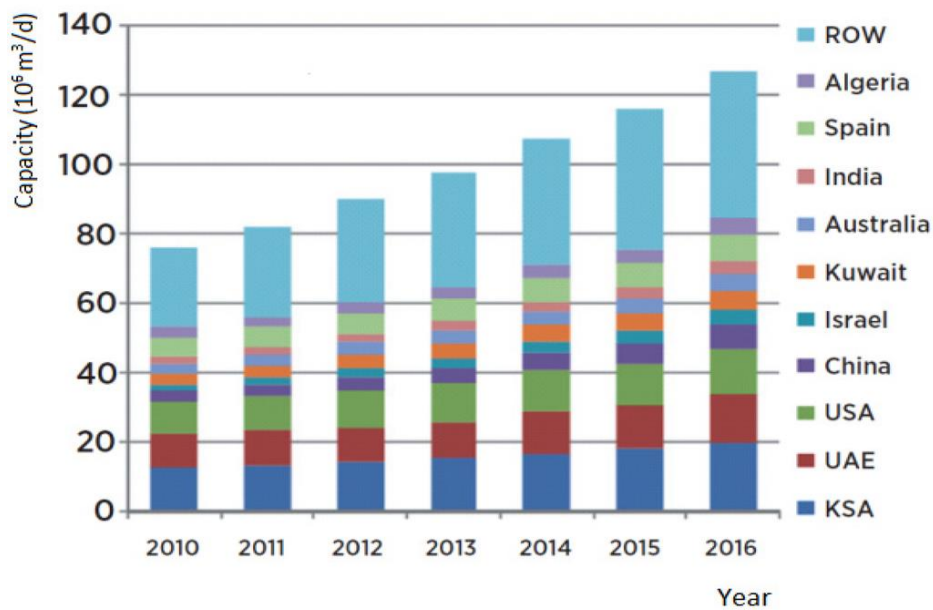


Figura 1.1. Capacidad de las instalaciones desalinizadoras por países [37].

En el ámbito nacional también hay planes gubernamentales ambiciosos como es el programa AGUA (2005-2011) [4, 23] (Actuaciones para la Gestión y la utilización del Agua). Este programa se centró en abastecer el regadío de las cuencas mediterráneas, hasta un total de 850 hm³/año, basándose en la tecnología de la desalinización. De esta manera, a tres plantas ya existentes, con una capacidad de 100.000 m³/día (Carboneras, Atabal y Valdelentisco), se sumaron otras como San Pedro del Pinatar, Alicante, Águilas, Barcelona y Torrevieja, que también superan esta cifra. Además este programa va más allá de la mera ejecución de la infraestructura, ya que se tendrá que operar las instalaciones durante un período de quince años bajo criterios estrictos de calidad y de consumo energético. La ejecución del programa AGUA ha colocado a

España entre las primeras potencias mundiales de la desalación, además han favorecido a que las empresas españolas estén en los primeros puestos del sector a la hora de la construcción y gestión de instalaciones desaladoras.

Actualmente el desarrollo en las plantas de desalación tiene dos grandes vertientes: procesos con cambios de fase en los que se incluye la destilación MD y congelación, y procesos sin cambio de fase como la ósmosis inversa y electrólisis. En el apartado 2.1 se hace una descripción detallada de todos los tipos.

La destilación por membranas es una de las tecnologías que más se está investigando debido a sus condiciones de funcionamiento, a su baja temperatura de operación (60-90°C), a los bajos requerimientos de mantenimiento y a su facilidad para acoplarse a las tecnologías solares. Sin embargo, esta tecnología todavía no ha sido implementada industrialmente y solo hay unas cuantas plantas piloto que se utilizan en labores de investigación. Las principales barreras de estos sistemas son el diseño de la membrana y del módulo así como la incertidumbre en los costos energéticos y económicos. Una de las pocas plantas piloto de investigación descrita completamente en la literatura es la instalación de destilación por membranas MD situada en la PSA [16, 17, 36].

MD es un proceso de separación impulsado térmicamente producido en una membrana hidrófoba porosa. Gracias a la diferencia de presión de vapor entre los dos lados de la membrana, se establece un flujo de moléculas de vapor mientras que los componentes no volátiles son rechazados. Teóricamente rechaza el 100% de los componentes no volátiles y tiene la capacidad para tratar soluciones acuosas con muy alta salinidad. Además el agua de alimentación no requiere un pretratamiento químico fuerte como en el caso del requerido para el proceso de ósmosis inversa.

Las investigaciones recientes en este tipo de tecnología se centran en la evaluación, por medio de campañas experimentales, de diferentes tipos de módulos y configuraciones. La producción de destilados, el consumo de energía específica y la eficiencia térmica son los parámetros más relevantes para evaluar el rendimiento de un módulo de membrana [16, 17, 36].

Desde el punto de vista de la ingeniería de control, en la literatura solo hay unos pocos trabajos que tratan sobre estrategias de control para este tipo de plantas piloto, centrados sobre todo en el modelado dinámico y optimización en las membranas de destilación y en lazos de control para la temperatura. Por tanto, una tarea a abordar es la automatización de la instalación y el estudio de puntos de operación óptimos para estas plantas, centrándose en aspectos económicos y en la calidad del producto, contribuyendo así a la eficiencia de las plantas de desalación [9, 10, 12, 21, 29].

1.3 Objetivos

Los objetivos principales de este trabajo consisten en establecer un funcionamiento automático y óptimo para una planta piloto de destilación por membranas alimentada por energía solar, situada en la Plataforma Solar de Almería.

Para conseguir conclusiones relevantes en las campañas de investigación mencionadas anteriormente sobre estas plantas, las variables que intervienen en el proceso (temperatura del agua y caudal de alimentación) deben mantenerse en condiciones estacionarias. Sin embargo debido a la variabilidad de la irradiancia, las condiciones de temperatura son difíciles de controlar de forma manual incluso para operadores cualificados. Este hecho puede dar lugar a una extensión temporal indeseable de las campañas experimentales o al uso de fuentes de energía no renovables para cumplir los requisitos de la operación.

Así, este tipo de plantas demandan un sistema de control capaz de mantener el caudal y la temperatura de entrada al módulo MD en un punto de operación óptimo y que permita mejorar el funcionamiento del sistema, reduciendo el uso de energía no renovable. Además, debido a la naturaleza híbrida de la planta piloto, se identificarán modos de operación óptimos que permitan la operación de la forma más eficiente posible.

1.4 Fases de desarrollo

A continuación se describen las diferentes fases de desarrollo del trabajo, así como el tiempo empleado en cada fase:

- 1) Recopilación bibliográfica. Se consultan libros de texto y artículos científicos buscando información sobre el funcionamiento de este tipo de plantas y sobre los fundamentos físicos y químicos del proceso de desalación.
- 2) Análisis y familiarización con la instalación. Identificación de los sensores y actuadores de regulación automática y de las variables a controlar y estudio del sistema de adquisición de datos y control (SCADA, *Supervisory Control and Data Acquisition*) de la instalación. Análisis de datos suministrados por los investigadores responsables de la planta.
- 3) Definición de los modos de operación. En esta fase se estudia el carácter híbrido del sistema, definiendo modos de operación atendiendo a los modos empleados hasta el momento por los investigadores y proponiendo nuevos.
- 4) Propuesta preliminar de posibles lazos de control. Utilizando los elementos de regulación automática se hace una propuesta preliminar de lazos de control para la planta.
- 5) Obtención de modelos. Realización de ensayos en lazo abierto para la identificación de las diferentes dinámicas que presenta la planta. Obtención de

modelos dinámicos utilizando datos de identificación obtenidos a partir dichos ensayos.

- 6) Validación de modelos. Utilizando datos diferentes a los empleados para la obtención de modelos se comprobará la validez de dichos modelos.
- 7) Diseño de los controladores. Se estudian las necesidades a cubrir y se eligen los métodos más adecuados para el cada caso (PID, cascada, control por adelanto, etc.)
- 8) Pruebas de los lazos de control. Mediante los modelos dinámicos obtenidos y haciendo uso de Matlab y su librería *Simulink*, se simulan los controladores para probar su correcta sintonía.
- 9) Implementación de los lazos de control en la planta. Se implementan los controladores utilizando el entorno LabVIEW para modificar el SCADA que gobierna la planta. Posteriormente se prueba su correcto funcionamiento.
- 10) Análisis de resultados. Se realiza un análisis exhaustivo de resultados, comparando tiempos de respuesta y otros índices de desempeño con los obtenidos mediante la operación manual de la planta.
- 11) Elaboración de la memoria.

Fase de desarrollo	Tiempo dedicado [h]
Recopilación bibliográfica	25
Análisis y familiarización con la instalación	25
Definición de los modos de operación	15
Propuesta preliminar de lazos de control	15
Obtención de modelos	70
Validación de modelos	50
Diseño de los controladores	30
Prueba de los controladores	50
Implementación en la planta	50
Análisis de resultados	30
Elaboración de la memoria	70

Tabla 1.1. Tareas realizadas y tiempo estimado dedicado a cada una de ellas.

1.5 Resumen de resultados

Una vez evaluadas todas las variables que afectan al proceso de desalación y después de analizar la configuración del sistema y las características de los modelos obtenidos, se ha optado por implementar tres lazos de control simultáneos. El primero de ellos se encarga de controlar la temperatura de salida del campo solar, el segundo también se encarga de controlar temperatura pero en la siguiente etapa de la planta mediante la regulación automática de un aerotermo, y el último se encarga de mantener las condiciones fijadas de temperatura y de caudal a la entrada del módulo MD.

Para estos lazos de control se han diseñado controladores tipo PID en diferentes configuraciones, como es la configuración en cascada, siguiendo las reglas de sintonía que más se ajustaban para cada caso (en base a los modelos obtenidos), consiguiendo respuestas en lazo cerrado que mejoran los tiempos de establecimiento y el error en régimen estacionario que se consiguen a través de la operación manual. Además se han implementado también controladores anticipativos para contrarrestar los efectos de las perturbaciones, variables no manipulables, como son la radiación, temperatura ambiente y caudal, así como técnicas de filtrado para eliminar el ruido en determinadas variables.

Como se comentará en la sección de trabajos futuros, quedaría el desarrollo de un cuarto bucle de control que se encargue de controlar el caudal de alimentación para conseguir una producción de destilado optimizada. En este trabajo no se ha incluido porque en la actualidad los investigadores de la planta trabajan con caudales de alimentación constantes, quedando para el futuro el análisis de este cuarto bucle de control.

Capítulo 2: Revisión bibliográfica

En este capítulo se detallan los aspectos más importantes encontrados en la bibliografía consultada y se aporta información sobre procesos de desalación y sobre las estrategias de control y modelado seguidas para abordar el problema.

2.1 Tipos de procesos de desalación

La desalación o desalinización consiste en la eliminación de los compuestos salinos disueltos en el agua salada con el fin de hacerla potable o reducir la salinidad para su uso. Los procedimientos de desalación son numerosos y responden a técnicas muy diversas (Tabla 2.1).

Separación	Energía	Proceso	Método
Agua de sales	Térmica	Evaporización	Destilación súbita (<i>flash</i>)
			Destilación multiefecto
			Termocompresión de vapor
			Destilación solar
	Cristalización	Congelación	
		Formación de hidratos	
	Filtración y evaporización	Destilación con membranas	
Mecánica	Evaporación	Compresión mecánica de vapor	
		Filtración	Ósmosis inversa
Sales de agua	Eléctrica	Filtración selectiva	Electrodialisis
	Química	Intercambio	Intercambio iónico

Tabla 2.1. Métodos de desalación existentes en el mercado [24].

2.1.1 Destilación súbita por efecto flash (MSF)

La desalación obtenida por destilación consiste en evaporar agua para conseguir vapor que no contiene sales (éstas son volátiles a partir de 300°C), condensándose posteriormente.

Así, la utilización de una cámara *flash* permite una evaporación súbita previa a su posterior condensación. Esta tecnología es el proceso evaporativo más ampliamente utilizado en el mundo y de implantación masiva sobre todo en Oriente Medio.

2.1.2 Destilación por múltiple efecto (MED)

Al contrario que en proceso MSF por efecto *flash*, en la destilación por múltiple efecto (MED) la evaporación se produce de forma natural en una cara de los tubos de un intercambiador, aprovechando el calor latente desprendido por la condensación del vapor en la otra cara del mismo.

Una planta MED tiene varias etapas conectadas en serie a diferentes presiones de operación, dichos efectos sucesivos tienen cada vez un punto de ebullición más bajo por el efecto de la presión. Esto permite que el agua de alimentación experimente múltiples ebulliciones, en los sucesivos efectos, sin necesidad de recurrir a calor adicional a partir del primer efecto.

La capacidad de este tipo de plantas es más reducida que las MSF, sin embargo tiene un mejor rendimiento global. Además el consumo eléctrico es menor ya que necesita menos bombas de circulación al no existir recirculación de la salmuera.

2.1.3 Compresión térmica de vapor (TVC)

La compresión térmica de vapor obtiene el agua destilada con el mismo proceso que una destilación por múltiple efecto MED, pero utiliza una fuente de energía térmica diferente. Son los llamados compresores térmicos o termocompresores, que consumen vapor de media presión proveniente de una planta de producción eléctrica.

El rendimiento de este tipo de planta es similar a las de las plantas MED, sin embargo su capacidad desaladora puede ser mucho mayor.

2.1.4 Destilación solar

Esta tecnología tiene como principio básico el efecto invernadero, ya que el sol calienta una cámara de aire a través de un cristal transparente, en cuyo fondo se dispone de agua salada en reposo. A pesar de tener un coste energético nulo y escasa inversión necesaria, su baja rentabilidad reside en su escasa producción por metro cuadrado de colector al destilarse sólo unos litros al día en el caso de condiciones climatológicas favorables.

2.1.5 Congelación

Este proceso consiste en congelar el agua y recoger los cristales de agua pura formados para fundirlos y obtener un agua dulce independientemente de la concentración del agua inicial. Aunque es un proceso sencillo, el principal inconveniente para su explotación industrial, es el aislamiento térmico para mantener el frío así como los mecanismos para la separación de los cristales de hielo.

2.1.6 Formación de hidratos

Es otro método basado en el principio de la cristalización, que consiste en obtener, mediante la adición de hidrocarburos a la solución salina, unos hidratos complejos en forma cristalina, con una relación molécula de hidrocarburo/molécula de agua del orden de 1/18.

Al igual que el proceso anterior, su rendimiento energético es mayor que los de la destilación, pero conlleva una gran dificultad tecnológica a resolver en cuanto a la separación y el lavado de los cristales que impiden su aplicación industrial.

2.1.7 Destilación por membranas

Es un proceso combinado de evaporación y filtración. El agua salada bruta se calienta para mejorar la producción de vapor, que se expone a una membrana que permite el paso de vapor pero no del agua (membrana hidrófoba). Después de atravesar la membrana el vapor se condensa, sobre una superficie más fría, para producir agua limpia de sales.

2.1.8 Compresión mecánica de vapor (CV)

En la compresión mecánica de vapor CV el agua salada, en un lado de la superficie de intercambio, se comprime lo suficiente para que se condense en el otro lado y pueda mantenerse el ciclo de destilación de agua salvando las pérdidas del proceso y la elevación de la temperatura de ebullición del agua respecto a la pura.

El consumo específico de estas instalaciones es el más bajo de los procesos de destilación, pero tiene el inconveniente de que no existen compresores volumétricos de vapor de baja presión de tamaño suficiente para una producción considerable.

2.1.9 Ósmosis inversa

Este método se basa en el empleo de membranas semipermeables que permiten el paso del agua, pero no el de sales disueltas. El principio físico de la tecnología es el proceso de ósmosis, que es un fenómeno natural que se produce en las células de los seres vivos, por el cual dos soluciones de distinta concentración salina puestas en contacto a través de una membrana semipermeable tienden a igualar sus concentraciones.

Si se separa por una membrana semipermeables dos compartimentos abiertos a la atmósfera, uno de los cuáles contiene agua pura y el otro una solución acuosa de sales, se comprueba que el agua pura atraviesa la membrana hacia la solución acuosa de sales, aumentando la presión del lado de la solución de sales hasta alcanzar un cierto valor (presión osmótica) suficiente para anular el caudal de agua que atraviesa la

membrana. Este fenómeno constituye la ósmosis directa y se da, de forma general, entre dos soluciones acuosas de diferentes concentraciones.

2.1.9 Electrodiálisis.

Este proceso permite la desmineralización de aguas salobres haciendo que los iones de diferente signo se muevan hacia zonas diferentes aplicando campos eléctricos con diferencias de potencial aplicados sobre electrodos, y utilizando membranas selectivas que permitan sólo el paso de los iones en una solución electrolítica como es el agua.

Es un proceso que solo puede separar sustancias que están ionizadas y por lo tanto su utilidad y rentabilidad está solo especialmente indicada en el tratamiento de aguas salobres o reutilización de aguas residuales.

2.1.10 Intercambio iónico.

Las resinas de intercambio iónico son sustancias que cuentan con la propiedad de que intercambian iones con la sal disuelta si se disponen en contacto.

La desmineralización por intercambio iónico proporciona agua de gran calidad si la concentración de sal es menor de 1 gr/l.

2.2 Proceso de destilación 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 [20].

MD es un proceso de transporte de vapor impulsado térmicamente a través de membranas microporosas e hidrófobas [2, 8, 17]. El nombre de esta tecnología (MD) proviene de la similitud del proceso MD con la destilación convencional, ya que ambas tecnologías se basan en el equilibrio de vapor o líquido para la separación, requiriendo calor que se suministra a la solución para llegar al calor latente de vaporización.

La tecnología MD se aplica como un proceso de membrana no isotérmico, en el cual, la fuerza de conducción se aporta mediante el gradiente de presión parcial que se produce a través de una membrana porosa y no humedecida por el líquido del proceso. La diferencia de presión de vapor a través de la membrana que impulsa el proceso MD se puede establecer utilizándolas las siguientes cinco configuraciones (Fig. 2.1):

2.2.1 Destilación por contacto directo (DCMD)

Es la configuración más simple y se produce cuando una solución más fría que la solución de alimentación está en contacto directo con el lado permeable de la membrana. 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.

La principal desventaja de esta configuración es que el contacto directo con la solución de condensación fría aumenta significativamente las pérdidas de calor a través de la membrana.

2.2.2 Destilación por membrana con espacio de aire (AGMD)

En esta configuración, un canal de aire estancado entre la membrana y la superficie de condensación reduce las pérdidas de calor por conducción que se producen en la tecnología DCMD, pero incrementa la resistencia a la transferencia de masa.

2.2.3 Destilación por membrana con barrido de gas (SGMD)

En esta configuración, un gas inerte frío se utiliza 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.

2.2.4 Destilación por membrana líquida (LGMD)

Esta configuración es una modificación de la 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.

2.2.5 Destilación en condiciones de vacío (VMD)

En esta configuración 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. Las ventajas de MD [11, 36] con respecto a las demás tecnologías son que normalmente no requiere un pre-tratamiento de las aguas, que es un proceso que no tiene una demanda energética alta pudiendo utilizar energías renovables como la energía solar y que la producción obtenida es de elevada calidad.

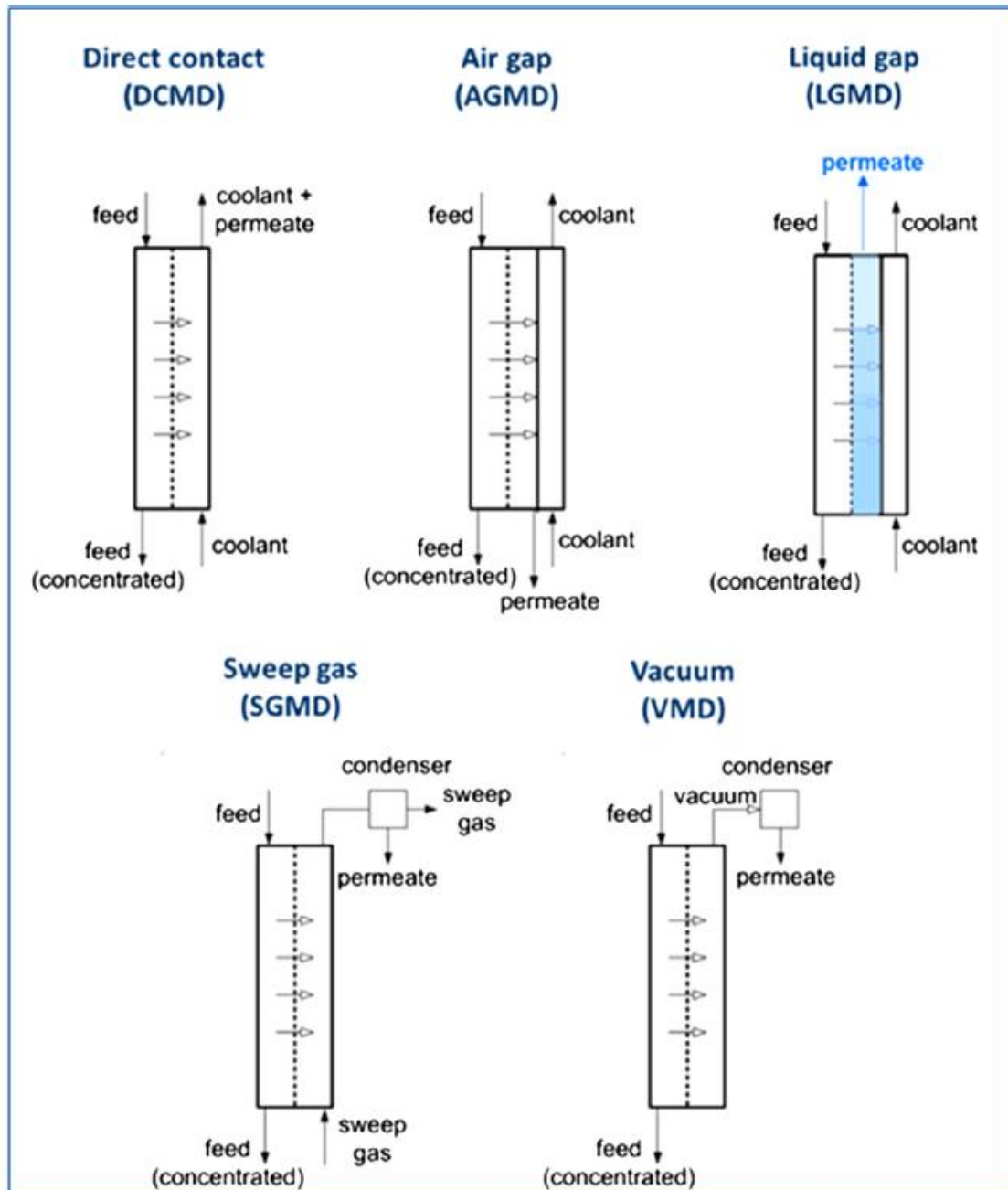


Figura 2.1. Diferentes configuraciones MD [36].

2.3 Eficiencia en el uso de la energía solar térmica para la planta piloto de destilación por membranas MD

Como se ha mencionado anteriormente, la línea actual de eficiencia en este tipo de plantas, consiste en alimentarlas mediante energías renovables. Entre los sistemas de desalación térmica solar como el caso de la tecnología MD se distinguen dos categorías diferentes; la desalación solar directa y la indirecta. Un proceso de desalación solar es

indirecto cuando el proceso de captación solar se realiza en un sistema independiente del proceso de destilado, mientras que si ambas partes se llevan a cabo de forma integrada el sistema es denominado directo.

Así, la planta piloto de destilación por membranas situada en la PSA (Fig. 2.2) consta de un campo de energía solar térmica constituido por colectores solares estáticos conectados a un sistema de distribución que puede alimentar diferentes dispositivos [36].



Figura 2.2. Planta piloto de destilación MD situada en la Plataforma Solar de Almería.

En esta instalación se han probado dos campos solares diferentes, el primero consistía en un campo de colectores parabólicos (CPC 3E+ de AoSol Energias Renováveis, S.A, Portugal) con una potencia térmica de 150 kW a 85°C. El segundo (utilizado actualmente), se trata de un campo de colectores planos (Solaris CP1 Nova de Solaris, España) constituido por 10 colectores de 2 m² cada uno con una potencia térmica de 7 kW a 90°C, y que utiliza agua como medio de transferencia de calor. En ambos casos los campos están conectados a un sistema de almacenamiento térmico para ayudar al suministro de calor en condiciones de estado estacionario cuando se desee.

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 m³), que contiene una solución acuosa con sales marinas 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 (ver esquema de la instalación completa en la Fig.3.1)

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.

2.4 Sistemas de control para plantas de destilación por membranas MD

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, en la literatura hay muy pocos trabajos desde el punto de vista de la ingeniería de control para este tipo de plantas. A continuación, se hace una revisión de las diferentes publicaciones y trabajos consultados para la realización del sistema de control.

El primer trabajo encontrado en este ámbito es el [11], donde se lleva a cabo una descripción general de dos modelos básicos pre-comerciales basados en la tecnología AGMD, junto con una descripción de las variables de operación que afectan al proceso. En [12] se presenta un modelo dinámico para membranas de contacto directo DCMD basado en una ecuación de advección-difusión 2D, con la cual se consigue modelizar dinámicamente y optimizar este tipo de plantas. En [25] sin embargo, se desarrolla una librería visual de Matlab con la cual se puede diseñar, simular diferentes tipos de sistemas y hacer cálculos de optimización para unidades de desalación. En [1], se presenta un trabajo de modelado y simulación de plantas con tecnología VMD alimentadas con energía solar. Este trabajo no está dirigido solamente a desarrollar un modelo matemático que describa el funcionamiento de las membranas VMD, sino que también determina su productividad diaria. En [9, 10], se desarrolla un modelo de simulación dinámica de un sistema de destilación por membrana AGMD alimentada solarmente mediante *Aspen Custon Modeler*, basado en la transferencia de calor y de masa. Además se presentan los efectos del uso de diferentes tipos de función objetivo, de la radiación solar, de las diferentes configuraciones del tanque de almacenamiento, así como de las velocidades del flujo del módulo de destilación. En [6] se describe la formulación de un problema de optimización de doble bucle para resolver ecuaciones no lineales con condiciones de salida y superficie de membrana desconocidas con el fin de implementar un procedimiento de simulación para minimizar el consumo de energía en tecnologías DCMD. También se implementó un lazo de salida externo para acoplarlo a una unidad de destilación por membrana DCMD de laboratorio, a escala real, con el cual se establecen las condiciones dinámicas deseadas en la maqueta, sobre la que se realizó una simulación casi en tiempo real con el fin de reducir al mínimo los gastos energéticos del proceso DCMD. En [35] se utilizó un proceso de optimización convexa para optimizar los puntos de operación en un enfoque de control jerárquico, con el objetivo de minimizar el consumo energético y maximizar la producción.

El primer trabajo de control automático se presenta en [21], donde se desarrolló un modelo de unidad SGMD con dos lazos de control de temperatura probados en simulación. En [9, 10] se propone un sistema de control utilizando controladores tipo PI, controladores todo/nada y sistemas de conmutación de dos niveles (alto y bajo) para control de temperatura.

El enfoque principal de control en la actualidad [29], consiste en un sistema de control basado en la optimización de una red neuronal para una unidad de destilación por membranas alimentada con energía solar. La naturaleza de dicha energía requiere un sistema de control discontinuo y con diferentes puntos de operación dependiendo de las condiciones de operación. Así, el modelo de red neuronal ha sido probado usando datos experimentales del proceso bajo diversas condiciones de operación (caudal de alimentación, radiación solar y temperatura de alimentación), desarrollándose un sistema de control para optimizar la producción de destilado.

2.5 Estrategias de control para el campo solar

El principal objetivo en este tipo de lazo de control, es mantener la temperatura del fluido a la salida del campo en un valor deseado (Fig. 2.3). Así, en [29, 31, 32] se trata un problema similar a este, el cual se resuelve mediante la implementación de un lazo de control en cascada, típico en los campos solares debido a que se dispone de una sola variable a manipular (variador de frecuencia de la bomba) con la cual se deben controlar dos variables de salida, el caudal de entrada al campo y la temperatura de salida del campo solar.

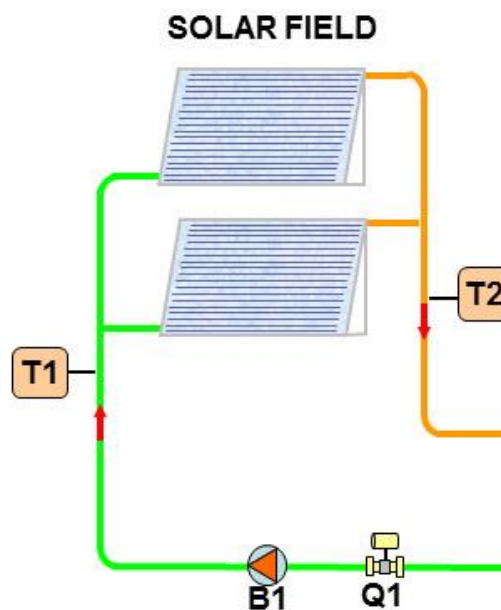


Figura 2.3. Diagrama esquemático del campo.

Por tanto, aplicando estos trabajos a la planta piloto, se utilizará un PI esclavo que se debe encargar de controlar el caudal mediante la actuación en el variador de frecuencia de la bomba (B1), mientras que el PI externo se encarga de elegir adecuadamente el caudal requerido para controlar la temperatura de salida a un valor deseado.

En estos lazos hay dos perturbaciones principales, la radiación y la temperatura de entrada al campo. Para el caso de la planta tratada en este trabajo, se considerarán tres perturbaciones al lazo de control, la temperatura de entrada al campo, la radiación y la temperatura ambiente. Así, estas perturbaciones pueden ser rechazadas mediante la combinación con el lazo de control en cascada de un controlador por adelanto en paralelo, el cual compensa las perturbaciones proporcionando el punto de operación de caudal en función de las condiciones de funcionamiento. Este esquema es típico en las plantas solares con colectores distribuidos y está descrito en [7].

Este controlador por adelanto se puede diseñar en base al modelado del campo solar realizado en [30, 31] suponiendo que la temperatura de salida del campo puede ser modelada mediante el comportamiento de un tubo hipotético equivalente con el mismo comportamiento que todo el campo solar.

2.6 Naturaleza híbrida de la planta

En la actualidad es habitual encontrar sistemas en los que existen diferentes modos de operación, como por ejemplo plantas en las que se utilizan energías renovables, donde suele haber una fuente secundaria de energía basada en los métodos convencionales (combustibles fósiles o electricidad) debido a las diferentes limitaciones de operación que se puedan presentar. Así, durante la operación se pueden ocasionar conmutaciones entre las dos fuentes de energía, que producen cambios en las dinámicas del proceso. A estos sistemas se les denomina sistemas híbridos y el estudio del control y del modelado de dichos sistemas es un campo que presenta una creciente actividad en la actualidad [3].

Por tanto, la planta piloto de destilación por membranas parece la candidata adecuada para hacer un estudio de su naturaleza híbrida, ya que cuenta con dos sistemas de alimentación; el campo solar y un tanque de almacenamiento aislado térmicamente con dos resistencias eléctricas para aumentar su temperatura (fuentes de energías convencionales). Además, incluye un circuito de enfriamiento con un aerotermostato. Dicho estudio estará basado en la definición de diferentes modos de operación como los definidos en [28] buscando la máxima eficiencia y el máximo aprovechamiento del campo solar.

Capítulo 3: Materiales y métodos

En este capítulo se describen todos los recursos utilizados, la instalación real y su funcionamiento así como el software empleado para el desarrollo del trabajo. También se describen los aspectos teóricos más relevantes y los métodos y teorías utilizados.

3.1 Descripción de la planta piloto de destilación por membranas

La instalación (Fig. 3.1) 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 conexiones simultáneas de diferentes unidades de membrana.

La fuente de energía térmica necesaria para conseguir la temperatura deseada en el módulo proviene de un campo solar térmico dividido en dos filas de colectores planos (Solaris CP1 Nova de Solaris, España) con cinco colectores por fila. Las dimensiones de los colectores Solaris CP1 son 2082 x 1082 x 85 mm. La superficie absorbente es de 2 m² y está fabricada en aluminio con recubrimiento selectivo de alta eficiencia. La cara expuesta está hecha de vidrio templado de 3.2 mm de espesor, con bajo contenido de hierro, mientras que los otros lados están aislados térmicamente con lana mineral de 25 mm. La potencia térmica nominal de este campo es de 7 kW a una temperatura de 90°C aproximadamente, usando como fluido térmico, agua con anticongelante (GEO FLUID 100, Saleplas) en una proporción de 22:100.

El campo está conectado a un tanque de almacenamiento térmico (1500 l), que puede ser utilizado para trabajar en condiciones estacionarias o cuando las condiciones meteorológicas no sean favorables. Este tanque incluye dos resistencias eléctricas que se pueden usar como una fuente de calor extra cuando el campo no suministre la temperatura necesaria para las condiciones de operación del módulo MD.

Cuando el tanque está frío, el módulo MD se acopla directamente al campo solar, cuya temperatura se puede controlar cambiando el caudal de entrada usando la bomba B1. Además, la salida del campo solar está equipada con un sistema de enfriamiento por ventilación para controlar el exceso de temperatura.

Los demás componentes de la instalación son; bombas (WILO-Stratos 25/1-6 CAN PN 10), medidores de caudal electromagnéticos (*Programag* 50P15 de Endress + Hauser), válvulas de bola con accionamientos de giro con tecnología universal de Sauter (AKM 115S), transmisores de presión (S10 *absolute* de WIKA) y sensores de temperatura PT100 con cabezal estándar IP67 equipados con vaina.

Para medir la radiación solar se usa un piranómetro (CM de Kipp + Zonen) con un ángulo de inclinación de 35°.

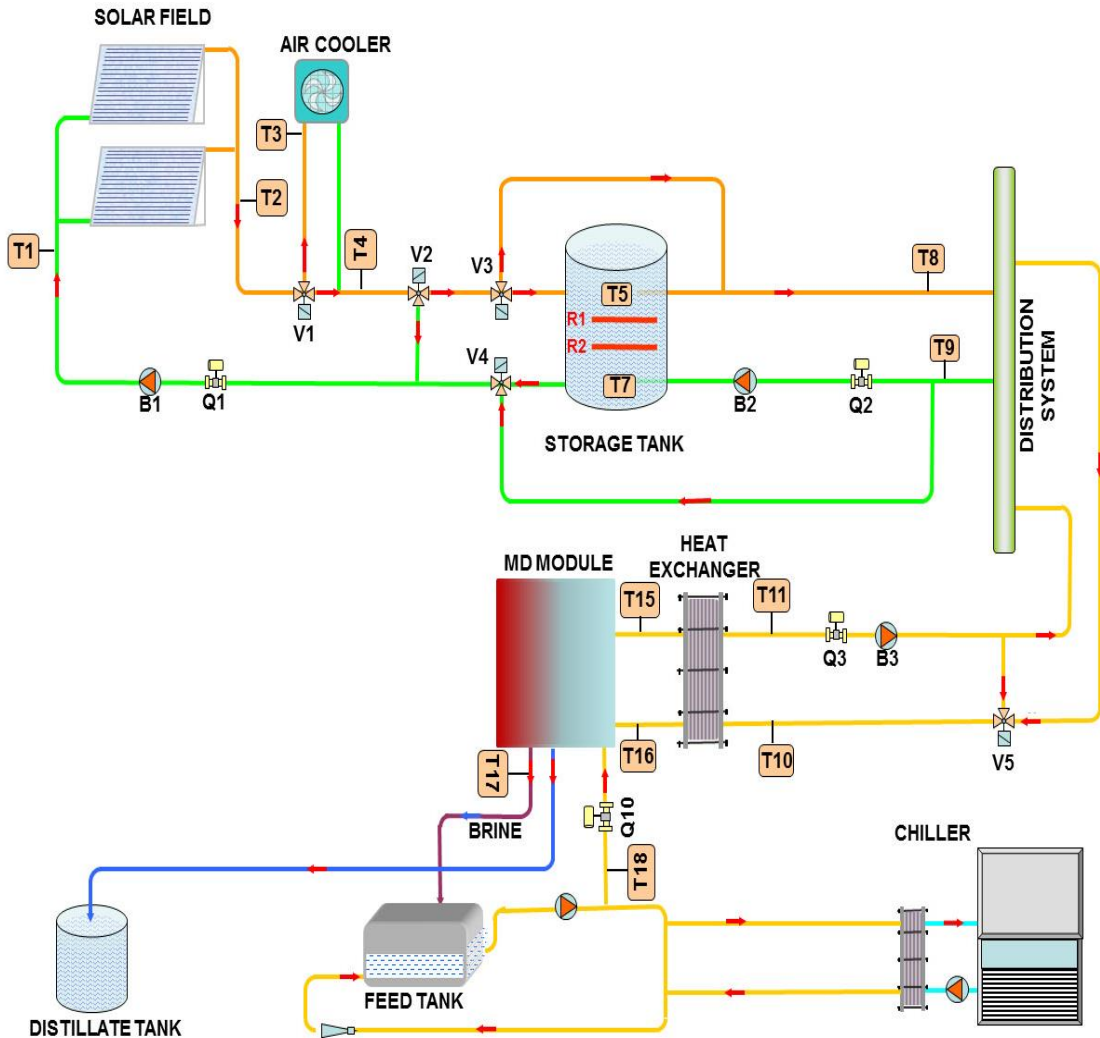


Figura 3.1. Diagrama esquemático de la planta: (SOLAR FIELD: campo solar, AIR COOLER: aerotermo, STORAGE TANK: tanque de almacenamiento, DISTRIBUTION SYSTEM: sistema hidráulico de distribución, HEAT EXCHANGER: Intercambiador de calor, MD MODULE: módulo MD, BRINE: salmuera, FEED TANK: tanque de alimentación, DISTILLATE TANK: tanque de destilado, CHILLER: enfriadora).

Actualmente en la planta hay implementado un sistema SCADA encargado de registrar todas las variables medidas. Así, todas las temperaturas, caudales y presiones son monitorizadas, supervisadas y controladas por el SCADA conectado a través de un autómatas programable (PLC, *Programmable Logic Controller*).

3.2 Material empleado

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 serán de tipo software:

- Matlab, este software se utilizará para el tratamiento de datos, para la identificación de modelos dinámicos mediante su librería de identificación, para la validación de los modelos y para la simulación de las estrategias de control mediante su librería *Simulink*.
- LabVIEW, para el manejo de la planta a través del SCADA y su paquete *Math Script Node* para la implementación de controladores.

3.2.1 Matlab

Matlab es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo que se usará para el tratamiento de datos, identificación de modelos, validación de modelos y simulación de los esquemas de control. Las características principales de este lenguaje son:

- Es un lenguaje de alto nivel para el cálculo numérico, la visualización y el desarrollo de aplicaciones.
- Tiene un entorno interactivo para la iterativa exploración, diseño y solución de problemas.
- Tiene funciones matemáticas para álgebra lineal, estadística, análisis de Fourier, filtrado, optimización, integración numérica y resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias.
- Gráficos integrados para visualizar datos y herramientas para crear gráficos personalizados.
- Herramientas de desarrollo para mejorar la calidad y el mantenimiento del código, así como para maximizar el rendimiento.
- Herramientas para crear aplicaciones con interfaces gráficas personalizadas.
- Funciones para integrar algoritmos basados en Matlab con aplicaciones y lenguajes externos como C, Java y Microsoft Excel.

Las principales funciones que se utilizarán en este trabajo son:

Funciones de adquisición de datos: Las funciones de entrada/salida de Matlab permiten trabajar con archivos de datos de cualquier formato. Así, es posible importar los datos provenientes del SCADA de la planta con formatos como el de Microsoft Excel o el .txt.

Funciones de análisis de datos: Matlab se usará para gestionar, filtrar y pre-procesar datos. Mediante el uso de diferentes funciones de análisis de datos como las funciones de filtrado y suavizado, interpolación y convolución que permiten realizar un

análisis exploratorio de datos experimentales que serán útiles para descubrir tendencias, probar suposiciones y elaborar modelos descriptivos.

En el contexto de la elaboración de modelos se encuentra su herramienta de identificación *Ident* con la cual se pueden crear modelos lineales y no lineales procedentes de datos de entrada/salida. Así, se pueden obtener modelos dinámicos que no son fáciles de obtener mediante primeros principios, permitiendo la entrada de datos en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Esta herramienta utiliza algoritmos de identificación tales como el algoritmo de mínimos cuadrados (que será descrito posteriormente).

Funciones de visualización de datos: En este trabajo se hará uso también de las funciones integradas para la creación de gráficos 2D. Estas funciones permiten visualizar y comprender los datos, además de comunicar los resultados. Además, los gráficos se pueden personalizar de forma interactiva o mediante programación.

En el ámbito de la programación, el lenguaje Matlab proporciona un soporte nativo para las operaciones de vectores y matrices que resultan fundamentales a fin de tratar con los grandes conjuntos de datos importados desde la planta. Además, no requiere realizar tareas de bajo nivel tales como declarar variables, especificar tipos de datos y asignar memoria.

Este software cuenta con un paquete llamado *Simulink*, que básicamente es un entorno de diagramas de bloques para la simulación y el diseño basado en modelos. Este entorno será muy útil en este trabajo, ya que da la posibilidad de hacer simulaciones de los esquemas de control propuestos. Las características se definen a continuación:

- Editor gráfico para crear y gestionar diagramas de bloques jerárquicos.
- Bibliotecas de bloques predefinidos para modelar sistemas continuos y discretos.
- Motor de simulación con resolvedores de ecuaciones diferenciales ordinarias de paso fijo y paso variables.
- Gráficos (*Scopes* y *data displays*) para ver los resultados de la simulación.
- Herramientas de gestión de proyectos y datos para administrar los archivos y los datos del modelo.
- Herramientas de análisis de modelos para perfeccionar la arquitectura del modelo y aumentar la velocidad de simulación.
- Bloque de *Matlab function* para importar algoritmos de Matlab en modelos.
- *Legacy Code Toll* para importar códigos de C y C++ a los modelos.

3.2.2 LabVIEW

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.

Las principales ventajas que nos proporcionan para la realización de este trabajo son:

Automatización de medidas y procesamiento de señales: A través LabVIEW se adquieren y se procesan medidas de la planta ya que está integrado con hardware de datos National Instrument, además se hará uso de sus bibliotecas de procesamiento de señales y controles de interfaz de usuario, que tienen como propósitos específicos son datos de medidas. Así, en el transcurso del trabajo se usará LabVIEW para desarrollar sistemas más rápidos, automatizar múltiples medidas y tomar decisiones basadas en datos.

Control de instrumentos: También se usará LabVIEW para obtener datos desde instrumentos autónomos desde cualquier tipo de bus. Así, combinando este software con controladores se pueden automatizar instrumentos, creando soluciones que se pueden programar y reconfigurar para cumplir con las necesidades. Además, para el desarrollo del trabajo, ha sido fundamental poder importar *scripts* de archivos.m mediante su biblioteca *Mathscripts* para la implementación de controladores, sistemas de conmutación, filtrado de señales etc.

Por tanto, para la implementación del sistema de control en la planta, se combinará el hardware reconfigurable existente en la planta y el software de diseño de sistemas LabVIEW para construir los diferentes lazos de control diseñados.

3.3 Metodología

A continuación se describen los fundamentos teóricos en los que están basados la resolución del problema.

3.3.1 Análisis de sistemas dinámicos en lazo abierto

En la planta piloto se presentan una gran cantidad de sistemas dinámicos, que se caracterizan por ser aquellos que evolucionan con el tiempo y en los cuales los efectos de una determinada acción que se ejerza sobre ellos no ocurre de forma instantánea. Son por tanto sistemas, cuya respuesta evoluciona en el tiempo con memoria de la respuesta pasada. Los sistemas disponen de entradas, entendidas como información que reciben del exterior y salidas, información procedente del sistema.

Para describir la conducta de los diferentes sistemas que se presentan en la planta piloto, se utilizarán modelos matemáticos, que describen la dinámica del proceso. Los modelos proporcionan una forma unificada para tratar con los diferentes sistemas presentes, que tendrán vital importancia para la simulación y el diseño del control.

Con el objetivo de obtener dichos modelos se debe realizar un análisis del sistema en lazo abierto. Las entradas típicas para el análisis del sistema son impulso, escalón y rampa. Para el caso de la identificación de modelos en la planta piloto, se utilizará la entrada en escalón (Fig. 3.2)

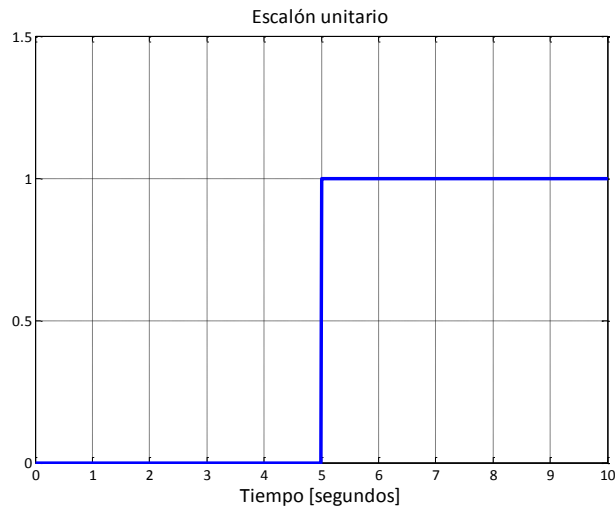


Figura 3.2. Escalón unitario.

Así, al someter al sistema a este tipo de entrada, se puede obtener una relación explícita directa entre la entrada $u(t)$ y la salida $y(t)$. También se puede elegir el tipo de modelo que más se ajuste a la respuesta (primer orden, segundo orden, integradores etc.) viendo el tipo de respuesta que se obtenga. En el dominio del tiempo, dicha relación suelen ser sistemas de ecuaciones diferenciales.

Para facilitar la operación con dichos modelos, se utilizará la transformada de Laplace que consiste en la transformación integral de una función $f(t)$ del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia $F(s)$, donde s es una variable compleja $s = \sigma + j\omega$. Esta transformación nos permite representar ecuaciones diferenciales ordinarias como ecuaciones algebraicas y se define como:

$$F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt; f(t) = 0, t < 0 \quad s = \sigma + j\omega \quad (3.1)$$

De forma práctica para este trabajo, se utilizará la función de transferencia $G(s)$ (ecuación (3.2)) para modelar los sistemas dinámicos, que se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la señal de salida $Y(s)$ y la transformada de Laplace de la señal de entrada $U(s)$ con condiciones iniciales nulas.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (3.2)$$

3.3.2 Modelado de sistemas

Un sistema dinámico puede ser modelado de múltiples formas, pero se utilizarán dos fundamentales; modelos físicos (basados en primeros principios) y modelos basados en datos experimentales.

Las funciones de transferencia con las que se trabajará serán del tipo primer orden con retardo (3.3), segundo orden con polos complejos conjugados y con retardo (3.4), segundo orden con polos reales y con retardo (3.5), tercer orden con polos reales, cero y con retardo (3.6) y tercer orden con un polo real, dos complejos conjugados, un cero y un retardo (3.7).

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-st_r} \quad (3.3)$$

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} e^{-st_r} \quad (3.4)$$

$$G(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} e^{-st_r} \quad (3.5)$$

$$G(s) = \frac{K(\beta s + 1)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)(\tau_3 s + 1)} e^{-st_r} \quad (3.6)$$

$$G(s) = \frac{K(\beta s + 1)}{(\tau s + 1)(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} e^{-st_r} \quad (3.7)$$

Siendo:

- K : La ganancia estática del sistema, que se define como el cociente entre el cambio experimentado por la salida en estado estacionario y la amplitud del escalón de entrada. En sistemas lineales corresponde con el valor de estado estacionario del sistema cuando la entrada es un escalón unitario.
- τ : Es una medida de rapidez del sistema. Para sistemas de primer orden indica el momento en el que el sistema alcanza un 63% del valor en estado estacionario tras la introducción de un escalón a la entrada y para sistemas de orden mayor indica la localización del polo $s = -1/\tau$ [s].
- t_r : Es el tiempo de retardo, tiempo que tarda la salida en reaccionar desde que se le aplica la entrada [s].
- ω_n : Es la frecuencia natural del sistema, frecuencia a la que oscilaría el sistema si no existiera amortiguamiento [rad/s].
- ξ : Factor de amortiguamiento relativo del sistema. El comportamiento dinámico de un sistema de segundo orden se puede describir en base a este parámetro, de forma que si $0 < \xi < 1$, los polos en lazo cerrado son complejos conjugados y el sistema se denomina subamortiguado, siendo la respuesta transitoria oscilatoria. Si

$\xi = 0$, la respuesta no se amortigua. Si $\xi = 1$, el sistema se denomina críticamente amortiguado. Si $\xi > 1$, el sistema será sobreamortiguado (Fig. 3.3).

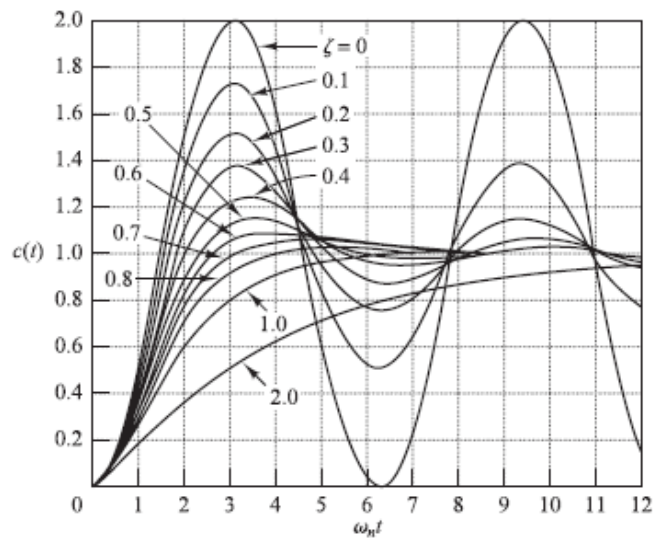


Figura 3.3. Curvas de respuesta a escalón unitario de sistema de segundo orden con diferente valor de ξ [27].

3.3.2.1 Modelos basados en datos experimentales. Identificación por mínimos cuadrados

Los modelos que se obtengan en base a datos experimentales con los tipo de entradas descritos anteriormente, serán de tipo lineales e invariantes en el tiempo y se expresan en forma de ecuaciones en diferencias en tiempo discreto (k). Esto quiere decir que la conducta del sistema no cambia con el tiempo y que se cumple el principio de superposición y por tanto a la entrada u_1 le corresponde la salida y_1 y a la entrada u_2 le corresponde la salida y_2 .

Así, para la identificación se ha utilizado el algoritmo de mínimos cuadrados. Este método ajusta los parámetros de un modelo en base a datos muestreados de la entrada y la salida del sistema y analiza la salida comparándola con un conjunto de datos distinto al que se usó para identificar, realizándose una validación del modelo obtenido. El método se plantea de la siguiente forma:

Identificando un sistema del tipo (nótese que los coeficientes a_i y b_i no son los del sistema en tiempo continuo representado por la función de transferencia $G(s)$):

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) = b_1 u(k-1) + \dots + b_n u(k-n) \quad (3.8)$$

Se define el vector regresor (3.9) y el vector de parámetros (3.10):

$$m(k) = [-y(k-1) \dots -y(k-n) \ u(k-1) \dots \ u(k-n)] \quad (3.9)$$

$$\theta = [a_1 \dots a_n \ b_1 \dots b_n]^T \quad (3.10)$$

Quedando el sistema definido como $y(k) = m(k) \cdot \theta$, y el error de predicción como:

$$e(k, \hat{\theta}) = y(k) - m(k) \cdot \hat{\theta} \quad (3.11)$$

Una vez definidos todos los parámetros, para la resolución final se irán obteniendo los valores de θ de forma que el error sea 0. Este algoritmo se ha utilizado mediante la librería de identificación del software Matlab *Ident* [22], en la cual se puede identificar un modelo fuera de línea en base a datos de entrada/salida, realizándose además una validación del modelo obtenido sobre los datos introducidos.

3.3.2.2 Modelado físico basado en primeros principios

Para la realización de este trabajo, se han obtenido dos modelos basados en primeros principios mediante balances de energías. A continuación se presentan los dos modelos.

- **Modelado de una válvula a tres vías:**

Para realizar un balance de energía en V5, se realizará un balance en base al flujo másico que entra por cada una de las vías. En la Fig. 3.4 se puede ver que la válvula en cuestión tendrá dos vías de entrada definidas por I y II y una de salida que se dirigirá a la entrada del módulo MD (ver Fig. 3.1).

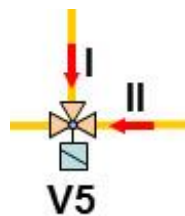


Figura 3.4. Esquema de la válvula a tres vías V5.

Por tanto, definiendo:

$$\dot{m}_I = \alpha \cdot \dot{m}_{salida} \quad (3.12)$$

$$\dot{m}_{II} = (1 - \alpha) \cdot \dot{m}_{salida} \quad (3.13)$$

Siendo α el porcentaje de apertura en tanto por 1 de la válvula V5. El balance realizado es el siguiente:

$$\dot{m}_{salida} = \dot{m}_I + \dot{m}_{II} \quad (3.14)$$

$$\dot{m}_{salida} \cdot h_{salida} = \dot{m}_I \cdot h_I + \dot{m}_{II} \cdot h_{II} \quad (3.15)$$

$$\dot{m}_{salida} \cdot \frac{dh_{salida}}{dT_{salida}} \cdot dT_{salida} = \dot{m}_I \cdot \frac{dh_I}{dT_I} \cdot dT_I + \dot{m}_{II} \cdot \frac{dh_{II}}{dT_{II}} \cdot dT_{II} \quad (3.16)$$

Donde el cociente $\frac{dh_i}{dT_i}$ corresponde a la capacidad calorífica del fluido, de forma que:

$$\dot{m}_{salida} \cdot c_{psalida} \cdot \Delta T_{salida} = \dot{m}_I \cdot c_{pI} \cdot \Delta T_I + \dot{m}_{II} \cdot c_{pII} \cdot \Delta T_{II} \quad (3.17)$$

Así, deshaciendo el cambio definido al principio y asumiendo que la capacidad calorífica es igual en cada una de las vías de V5:

$$\dot{m}_{salida} \cdot \Delta T_{salida} = \alpha \cdot \dot{m}_{salida} \cdot \Delta T_I + (1 - \alpha) \cdot \dot{m}_{salida} \cdot \Delta T_{II} \quad (3.18)$$

Finalmente se obtiene una ecuación (3.20) que proporciona un tanto por ciento de apertura de V5 en función de las condiciones de temperatura en cada una de las vías. Esta ecuación se utilizará para implementar un controlador por adelanto en el lazo de control de entrada al módulo MD.

$$T_{salida} = \alpha T_I + (1 - \alpha) T_{II} \quad (3.19)$$

$$V5(\%) = \frac{T_{salida} - T_{II}}{T_I - T_{II}} \cdot 100 \quad (3.20)$$

▪ **Modelado del campo solar:**

El modelo del campo solar, como se ha mencionado anteriormente, está basado en los trabajos [30, 31], en los cuales se establece un balance de energía, que aplicado al campo de la planta piloto quedaría:

$$\rho C_p A \frac{dT2(t)}{dt} = \beta I(t) - \frac{H}{L_{eq}} (\tilde{T}(t) - T_a(t)) - C_p \frac{\rho}{c_f} Q1_{FF}(t) \frac{(T2(t) - T1(t))}{L_{eq}} \quad (3.21)$$

Donde:

$$L_{eq} = L_a \cdot n_{cs} \quad , \quad \tilde{T} = \frac{T2 + T1}{2} \quad (3.22)$$

Así, con este balance, considerando condiciones de estado estacionario e imponiendo que la salida $T2$ coincida con la referencia $T2^f_{ref}$ se obtiene:

$$Q1_{FF}(t) = \left[\frac{\beta \cdot L_{eq}}{C_p \cdot (T2^f_{ref}(t) - T1(t))} \cdot I(t) - \frac{H}{C_p} \cdot \frac{(\tilde{T}(t) - T_a(t))}{(T2^f_{ref}(t) - T1(t))} \right] \cdot \frac{c_f}{\rho} \quad (3.23)$$

La ecuación (3.23), será utilizada en el lazo de control del campo para implementar un control por adelanto en paralelo, que proporciona el punto de operación en función de las condiciones de funcionamiento. Los parámetros H y β ,

se obtienen a través de un proceso de identificación usando datos reales de la instalación y su valor se estudiará en el siguiente capítulo de esta memoria.

3.3.3 Control PID

El control PID es el algoritmo más utilizados industrialmente [5] y es el elegido para implementar los controladores en la planta piloto. Este tipo de controlador está formado por tres parámetros característicos la acción proporcional (K_p), la acción integral (T_i) y la acción derivativa (T_d), que nos permiten cumplir las especificaciones de comportamiento deseadas en lazo cerrado. Así, el PID puede describirse como:

$$u(t) = K_p \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.24)$$

Donde $u(t)$ es la señal de control y $e(t)$ es el error de seguimiento ($e(t) = y_{sp}(t) - y(t)$) (ver Fig. 3.5). La señal de control es por tanto una suma de las tres acciones del controlador.

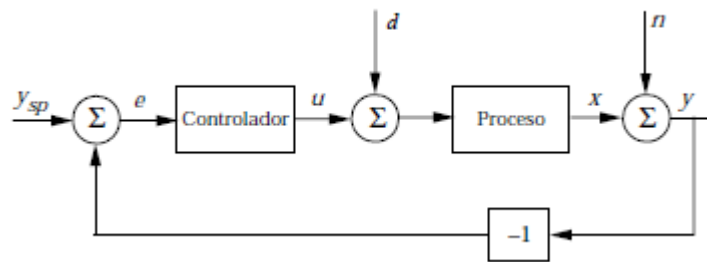


Figura 3.5. Diagrama de bloques de un lazo de realimentación simple [5].

3.3.3.1 Acción proporcional

Esta acción produce una señal de control proporcional al error de control (3.25), donde la K_p es la ganancia proporcional.

$$u(t) = K_p e(t) + u_b \quad (3.25)$$

La constante u_b permite eliminar el error de seguimiento (*offset*) cuando el error de control e es cero.

3.3.3.2 Acción integral

En este caso la señal de control se modifica a una velocidad proporcional a la señal de error, es decir, si la señal de error es grande, la señal de control se modifica con gran rapidez y viceversa.

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.26)$$

Esta acción tiene como función principal asegurar que la salida del proceso coincida con el punto de consigna en estado estacionario. Así, con el control proporcional normalmente se produce un error en estado estacionario que se elimina por completo gracias a la acción integral. Por tanto la combinación de las dos señales queda reflejada en la ecuación (3.27) y daría lugar a un controlador tipo PI.

$$u(t) = K_p \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (3.27)$$

Para valores grandes de T_i , la respuesta se mueve más lentamente hacia el punto de consigna, mientras que para valores más pequeños, lo hace de forma más rápida pero también se vuelve más oscilatoria.

3.3.3.3 Acción derivativa

La acción derivativa tiene como objetivo mejorar la estabilidad en lazo cerrado. Este tipo de acción no responde a las señales de error en estado estacionario, ya que su derivada es cero. Por esta razón hay que utilizarla combinándola con alguna otra acción del controlador. Así, para una acción derivativa pura, la señal de control es proporcional a la relación de cambio con respecto al tiempo de la señal de error.

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.28)$$

3.3.3.4 Sintonía de los controladores

Para la sintonización de los controladores implementados en la planta, se han utilizado métodos heurísticos (derivados de Ziegler-Nichols) y métodos de origen analítico. Para la selección del tipo de método se ha tenido en cuenta factores como la robustez exigida al lazo de control y tiempo de retardo normalizado, que es un índice que determina cómo de difícil es un sistema de controlar:

$$Q_{rn} = \frac{t_r}{T_{rm}}, 0 \leq Q_{rn} \leq 1 \quad (3.29)$$

El término T_{rm} cuantifica la velocidad de respuesta de un sistema y se conoce como Tiempo de residencia media. Por tanto, cuanto mayor sea Q_{rn} la dificultad a la hora de controlar el sistema aumenta.

Método AMIGO: El método AMIGO [5] se ha utilizado para diseñar controladores tipo PID para sistemas que presentan una dinámica de primer orden con retardo, como la mostrada en la ecuación (3.3). Este método tiene un buen compromiso entre robustez y rechazo a perturbaciones. Así, se pueden obtener respuestas suaves tanto para problemas de regulación como para problemas de seguimiento.

Las reglas de sintonía de este método se presentan a continuación:

$$K_p = \frac{1}{K} \left(0.2 + 0.45 \frac{\tau}{t_r} \right) \quad (3.30)$$

$$T_i = \frac{0.4t_r + 0.8\tau}{t_r + 0.1\tau} t_r \quad (3.31)$$

$$T_d = \frac{0.5t_r\tau}{0.3t_r + \tau} \quad (3.32)$$

Cancelación de polos: Este método de origen analítico [18], se ha utilizado para calcular los parámetros de un controlador tipo PI para un sistema que presenta una dinámica de primer orden. El desarrollo de este método se presenta a continuación:

Definiendo la función de transferencia que representa la dinámica del sistema como un sistema de primer orden cuya función de transferencia $G(s)$ está representada por la ecuación (3.3) y denominando a la función de transferencia del controlador tipo PI como $C(s)$:

$$C(s) = \frac{K_p(T_i s + 1)}{T_i s} \quad (3.33)$$

La función de la cadena directa de la planta quedaría:

$$L(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \cdot \frac{K_p(T_i s + 1)}{T_i s} \quad (3.34)$$

Igualando $\tau = T_i$ para cancelar el polo de la función $G(s)$, la función de transferencia de lazo $L(s)$ queda:

$$L(s) = \frac{K_p \cdot K}{T_i s} \quad (3.35)$$

Calculando la función de transferencia de bucle cerrado $T(s)$, se obtiene:

$$T(s) = \frac{1}{\frac{T_i}{K_p \cdot K} s + 1} \quad , \quad \tau_{bc} = \frac{T_i}{K_p \cdot K} \quad , \quad K_p = \frac{\tau}{K \cdot \tau_{bc}} \quad (3.36)$$

Así, τ_{bc} será la constante de tiempo en bucle cerrado que se impondrá. La especificación adoptada para el diseño de los controladores de la planta piloto es $\tau_{bc} = 0.8\tau$.

Método *Improved SimC*: El método *Improved SimC* [33, 34] se ha utilizado para sistemas de primer orden con retardos grandes (tiempo de retardo normalizados entre 0.4 y 0.8), debido a la buena respuesta que se consigue para este tipo de sistemas con retardo casi dominante. Los controladores calculados con este método son del tipo PI y sus reglas de sintonía se presentan a continuación. Se utiliza la nomenclatura de la

ecuación (3.3) para definir la función de transferencia que representa la dinámica del sistema.

$$K_p = \frac{1}{K} \cdot \frac{\tau + \frac{t_r}{3}}{\tau_{bc} + t_r} \quad (3.37)$$

$$T_i = \min \left\{ \tau + \frac{t_r}{3}, 4 \cdot (\tau_{bc} + t_r) \right\} \quad (3.38)$$

En este método τ_{bc} de nuevo es la constante de tiempo de bucle cerrado y para el diseño se ha optado que su valor este entre 0.65-0.8 la de bucle abierto, dependiendo del tipo de dinámica, el retardo que presente el sistema y la rapidez que se necesite para cada caso.

3.3.3.5 Mecanismo *anti-windup*

Debido a las limitaciones físicas de los actuadores utilizados (válvulas, bombas y aerotermo), en numerosas ocasiones el sistema de control puede entrar en saturación, produciéndose una diferencia entre la señal de control que se envía al proceso y la calculada por el controlador PI. Como consecuencia, aparecerá un error en estado estacionario que hará incrementarse de forma paulatina la señal de control proporcionada por el controlador PI como consecuencia de su término integral, de forma que cuando debido a un cambio en la referencia o en las perturbaciones el sistema salga de saturación, tardará un tiempo considerable en reaccionar debido a que su término integral ha alcanzado valores muy grandes. Este fenómeno se conoce como *integrator wind-up* [5]. Cuando esta situación ocurre, se deja de trabajar en bucle cerrado y se pasa a trabajar en lazo abierto ya que el actuador queda anclado en sus límites máximos o mínimos. Para evitar que esta situación se prolongue en el tiempo y se vuelva incontrolable se utiliza el mecanismo *anti-windup* que se encarga de recalcular el término integral en el controlador de forma que su nuevo valor de una salida dentro de los límites de la saturación.

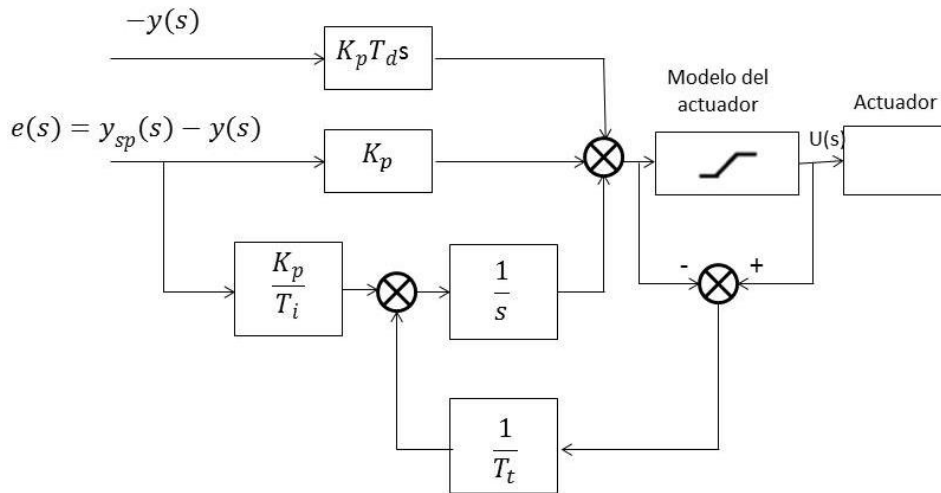


Figura 3.6. Controlador PID con mecanismo *anti-windup* [5].

Otra de las ventajas que presenta este mecanismo es que no resetea el integrador instantáneamente sino que utiliza una dinámica definida por una constante de tiempo T_t (constante de tiempo de *tracking*). Esta constante de tiempo debe ser más grande que T_d y más pequeña que T_i por tanto la regla de sintonía que se suele utilizar y la que se ha utilizado para la implementación en la planta piloto es $T_t = \sqrt{T_i \cdot T_d}$. Así, este mecanismo se implementará en todos los controladores de la planta piloto.

3.3.4 Control en cascada

Como se ha comentado anteriormente en el apartado 2.5 del capítulo 2, el control en cascada se ha utilizado para controlar la temperatura de salida del campo T2, ya que este tipo de estrategia de control se utiliza cuando se dispone de varias medidas del proceso, en este caso el caudal de entrada y la temperatura de salida, y una única variable de control que es el variador de frecuencia de la B1 [13, 14, 15]. La configuración de este lazo se puede ver en la Fig. 3.7.

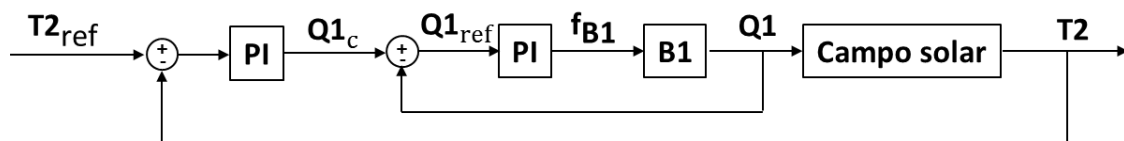


Figura 3.7. Esquema de control en cascada para el campo solar.

Así, como se ha descrito anteriormente, el PI externo dará la consigna de caudal que se necesite para controlar la temperatura de salida T2 y el PI interno dará una consigna en forma de % de funcionamiento al variador de frecuencia de la bomba para conseguir el caudal que se le pasa como consigna. Como especificación de diseño para este lazo se ha utilizado que la dinámica de lazo interno sea al menos 5 veces más

rápida que la del lazo externo, regla que garantiza el correcto funcionamiento del control en cascada.

3.3.5 Predictor de Smith

Los grandes retardos que aparecen en todas las dinámicas presentes en la planta piloto han hecho que el proceso de control automático se complique, especialmente para aquellos lazos en los que la variable a controlar es la temperatura [31]. Así, para los lazos donde el retardo era grande pero no dominante se ha utilizado el método de sintonización *Improved SimC* para solucionar este problema, pero para el control de temperatura en el sistema aerotermo-V1 donde los retardos sí son dominantes (tiempo de retardo normalizado ≥ 1) se ha utilizado el predictor de Smith (Fig 3.8). Este esquema proporciona mejoras significativas en la respuesta a cambios en el punto de consigna, aunque es sensible a incertidumbres de modelado [26].

En el caso de la planta piloto, debido a las variaciones de caudal, las incertidumbres de modelado son bastantes apreciables, ya que se ha optado por utilizar una dinámica que este en torno al rango medio del punto de operación para el diseño, de forma que los controladores sean lo más robustos posibles y el sistema de control se pueda implementar de la forma más sencilla en la planta real. Así, hay una diferencia significativa entre los modelos en diferentes puntos de operación, ya que normalmente la ganancia y los tiempos de retardo no son los mismos cuando el punto de operación está entorno al máximo o al mínimo. Por tanto, se ha optado por introducir un filtro paso bajo (ver Fig. 3.9) en la realimentación para solucionar los problemas de errores de modelado. El diseño del filtro se verá en el siguiente capítulo.

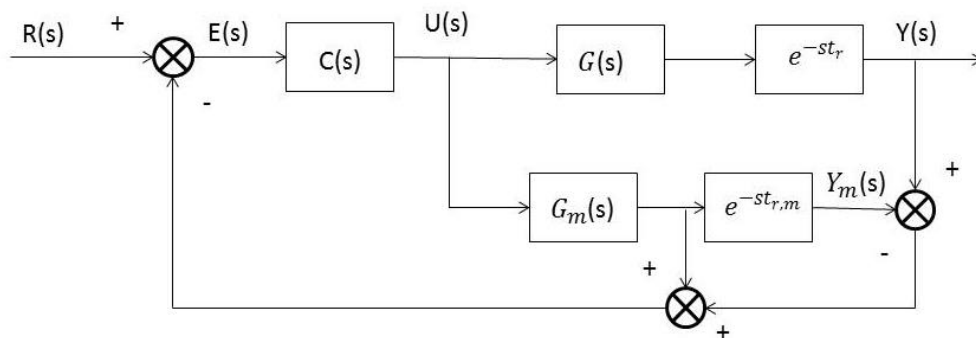


Figura 3.8. Diagrama de bloques de un predictor de Smith [5].

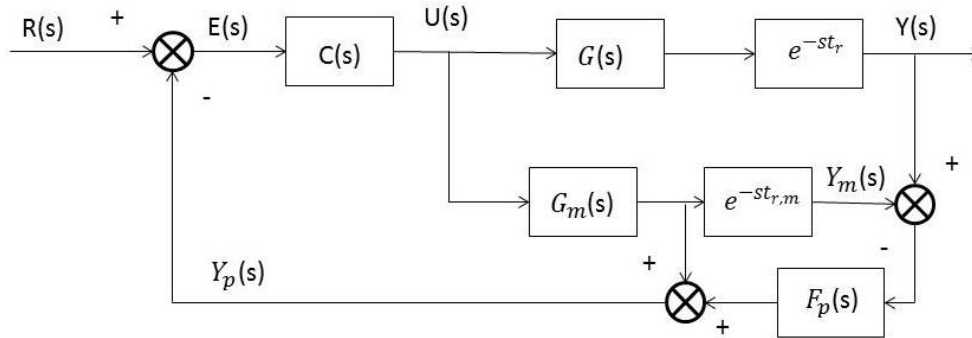


Figura 3.9. Diagrama de bloques de un predictor de Smith con filtro en la realimentación [26].

3.3.6 Control por adelanto

Otro elemento fundamental en el control de la planta piloto es el control por adelanto, técnica que complementa a la realimentación y que en este caso es necesaria para hacer frente a las numerosas perturbaciones a las que está sometido el sistema (radiación y temperaturas en diferentes puntos de la planta) y para mejorar la respuesta frente a cambios en el punto de consigna [7].

Así, para el caso del campo, el control por adelanto se ha utilizado para mejorar la respuesta frente a cambios de consigna. Este uso del control por adelanto permite diseñar el controlador para lograr robustez y buen seguimiento a consigna, mientras que el control por adelanto se encarga de mejorar la respuesta frente a cambios de consigna dependiendo de las condiciones de funcionamiento, utilizándose la ecuación planteada en la sección 3.3.2.2 de este capítulo (Modelado físico del campo solar), la cual suministra un valor de caudal dependiendo de la radiación, temperatura de entrada al campo, temperatura ambiente y consigna para T2. En la Fig. 3.10 se puede observar cómo quedaría el control por adelanto insertado en el diagrama de bloques de control del campo solar.

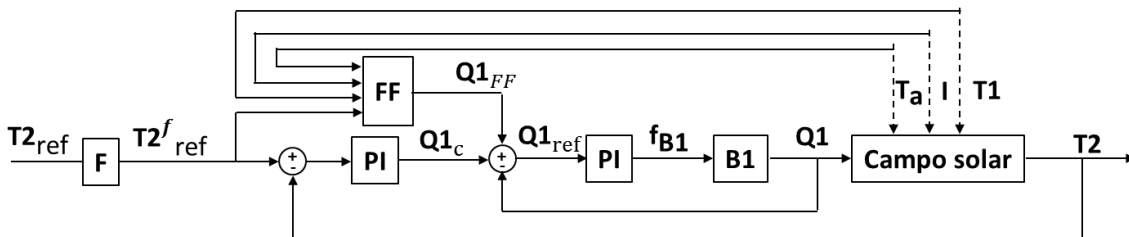


Figura 3.10. Diagrama de bloques del control del campo solar con control por adelanto.

En el caso del lazo de control de V5, el control por adelanto se utiliza igual que en el campo solar, de forma que la ecuación que se utiliza para implementarlo es la propuesta anteriormente en la sección 3.3.2.2 (modelado físico de la válvula a tres vías V5). Así, este controlador utiliza el valor de las perturbaciones de temperatura y la consigna de temperatura para mejorar la respuesta frente a cambios de consigna.

Por último, también se han utilizado controladores por adelanto centrados únicamente en el rechazo a perturbaciones. Mirando la Fig. 3.11, si a la planta entra una perturbación medible $D(s)$, de la cual se puede obtener un modelo de su comportamiento sobre la planta ($P(s)$), se puede diseñar un controlador por adelanto $F_{ff}(s)$ de la siguiente forma:

$$F_{ff}(s) = \frac{P(s)}{G(s)} \quad (3.39)$$

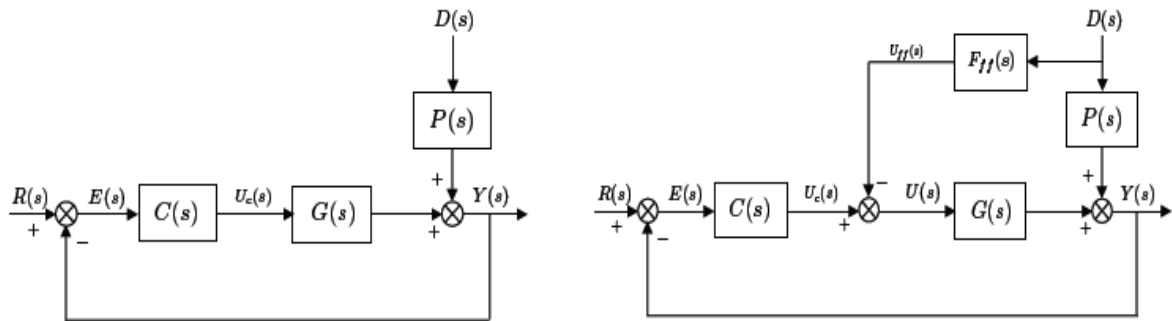


Figura 3.11. Diagrama de bloques sin control por adelanto (izquierda) y con control por adelanto (derecha) [5].

3.3.7 Filtrado de señales

El último elemento utilizado para completar los lazos de control ha sido el filtrado de las señales. En el caso de la planta piloto, se ha realizado filtrado en la referencia de los lazos de control y filtrado en las medidas de las variables.

Así, realizando el filtrado en la referencia de los lazos de control, se persiguen dos objetivos claros; disminuir la sobreoscilación frente al cambio de consignas del tipo escalón y desacoplar problemas de seguimiento y regulación. Los filtros implementados en la planta han sido todos filtros paso bajo del tipo representado por la ecuación (3.40), con ganancia estática unidad y cuya constante de tiempo ha sido calculada y escogida de forma práctica viendo su efecto directamente sobre el sistema en simulación y después haciendo pequeños ajustes sobre la planta real.

$$F(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (3.40)$$

También se han utilizado filtros para eliminar el ruido de medida y en algunos casos las dinámicas que puedan proporcionar el sensor de medida, sobre todo en el caso de las variables de temperatura, las cuales presentan un gran ruido. En la Fig. 3.12, se puede ver un ejemplo del filtrado realizado en una variable de temperatura apreciándose la gran efectividad del filtro en este tipo de variables. La constante de tiempo del filtro es de 1.05 segundos.

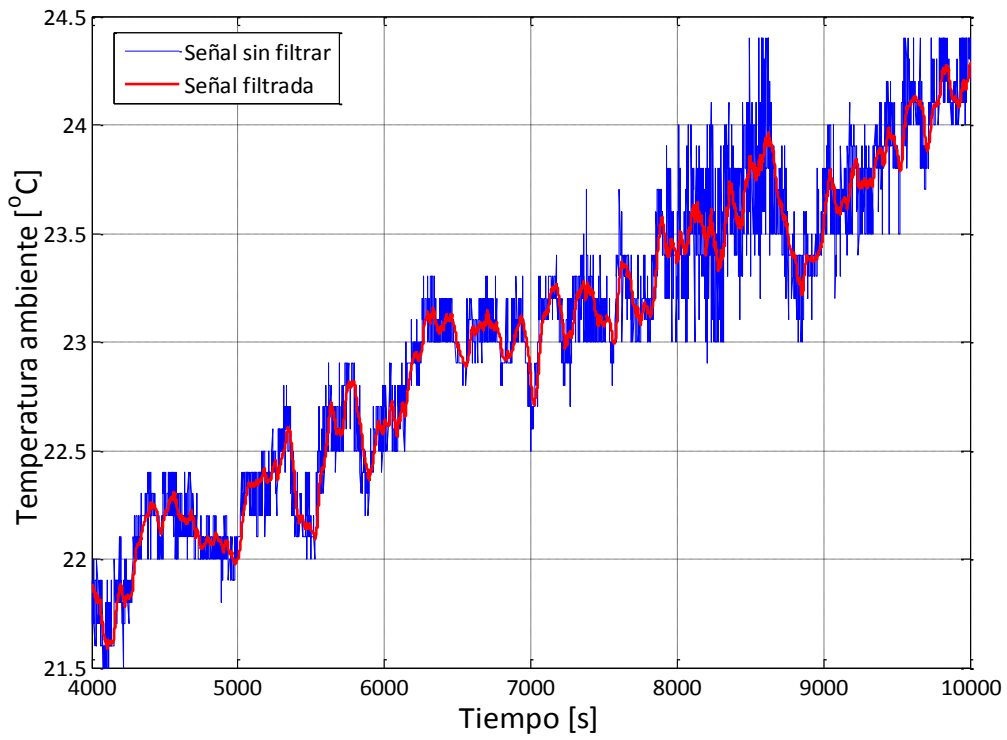


Figura 3.12. Filtrado de la señal temperatura ambiente.

Capítulo 4: Resultado y discusiones

En este capítulo se muestran todos los resultados de forma analítica y gráfica y se realiza una discusión de cada uno de ellos. Además, se presenta un análisis de la operación manual de la planta con el objetivo de comparar los resultados con los obtenidos mediante el control automático.

4.1 Análisis de la operación manual de la planta

La operación manual de la planta siempre se hace de la misma forma. Cuando la irradiancia está entre [600-700] W/m² se activa B1. La posición de las válvulas V1 y V2 es I y para V3 y V4 II atendiendo a la figura 4.3. Al inicio de la operación, se puede poner V2 en posición II para calentar el fluido más rápidamente hasta conseguir la temperatura deseada, momento en el cual V2 vuelve a posición I para calentar el resto del circuito. Cuando la temperatura T8 está 10°C por encima de la temperatura deseada en el módulo, la bomba B3 se activa y la temperatura T1 decrece considerablemente debido a que el fluido de retorno está aún frío y por tanto es necesario esperar. Debido a que la irradiancia va creciendo hasta llegar al mediodía solar, la temperatura proveniente del campo puede ser más alta de la necesaria para operar con el módulo MD, por tanto se debe utilizar el aerotermo para bajar la temperatura. Dicha regulación de temperatura se consigue variando el caudal de agua que pasa a través de él (mediante la válvula V1) y la frecuencia de funcionamiento del aerotermo. En la operación manual, solo se usa el tanque para días nublados o cuando la temperatura de éste es suficiente para operar.

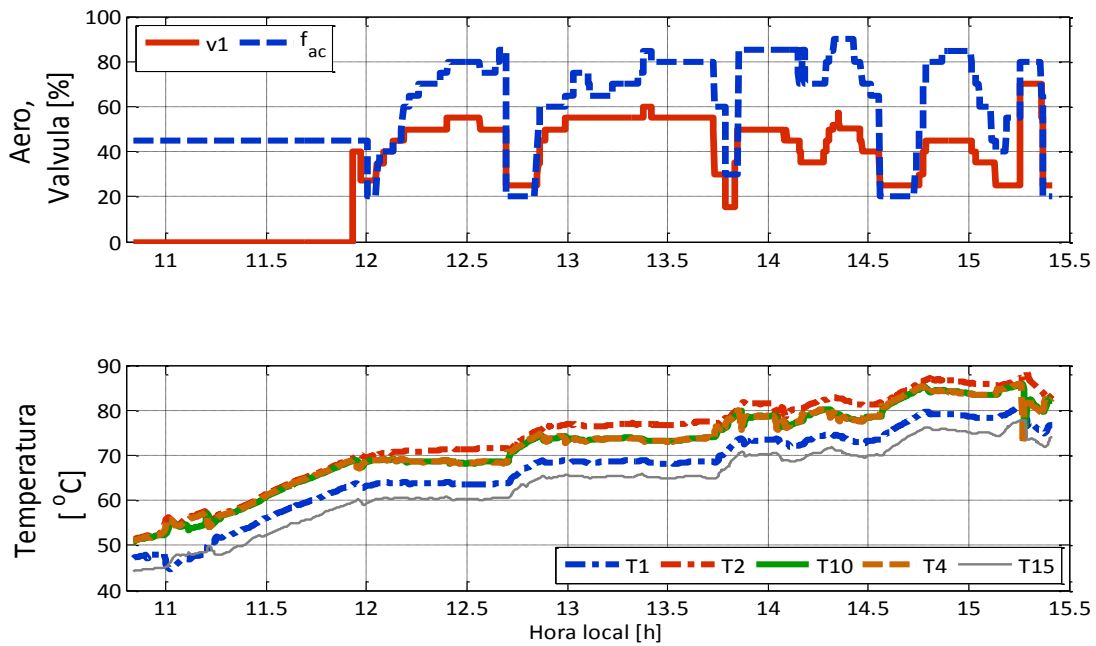


Figura 4.1. Operación manual. Apertura de válvula 1, aerotermo y temperaturas.

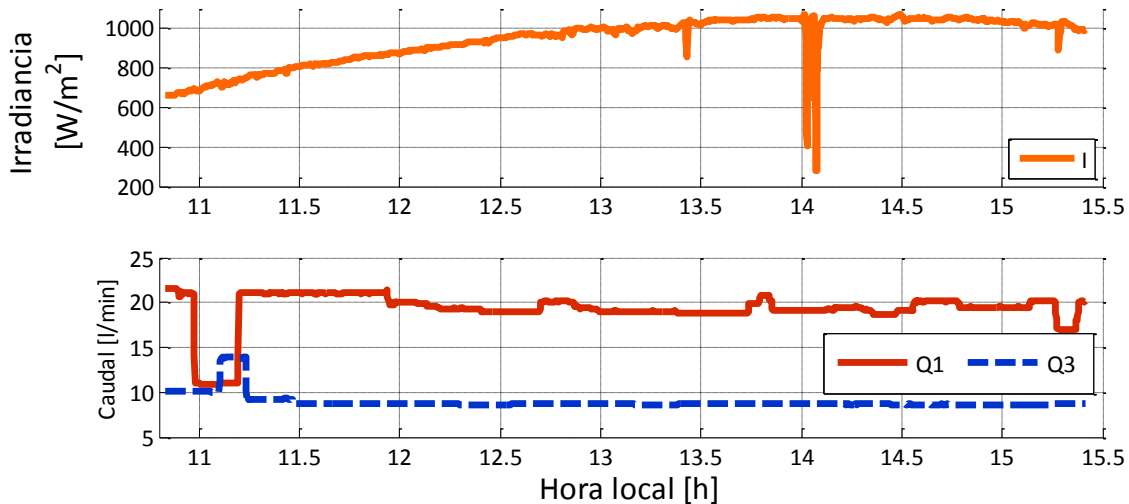


Figura 4.2. Operación manual. Irradiancia y caudales.

Las figuras 4.1 y 4.2 muestran los resultados de uno de los experimentos realizados en la planta de forma manual. El experimento empieza cuando se alcanza la temperatura deseada para operar con el módulo MD, y dura 255 minutos y el objetivo es comprobar la productividad del módulo MD variando la temperatura T15 (Fig. 4.3) entre 60 y 75°C con escalones de 5°C. Cada temperatura se mantiene durante 40 minutos (excepto la de 75°C debido a las condiciones meteorológicas). La hora local para cada variación de temperatura es: 60°C: 12:02-12:42; 65°C: 12:55-13:35; 70°C: 13:50-14:32; 75°C 14:45-15:05.

El caudal de alimentación dentro del módulo está sobre 8.3 l/min. Así, para conseguir la transferencia de calor adecuada y hacer la operación lo más eficiente posible, el caudal Q3 es el mismo. Sin embargo, para maximizar el calor proveniente del campo solar con la radiación existente, el caudal de Q1 es lo más alto posible, sobre los 20 l/min. Para valores iguales de Q3 y Q10 (Fig. 4.3), la diferencia entre T10 y la temperatura de dentro del módulo es de unos 8.5°C, por lo tanto para controlar la temperatura de dentro del módulo es necesario mantener T10 8.5°C por encima de esta, por esta razón, es necesario el uso del aero para controlar la temperatura. En este experimento se decidió trabajar con una apertura de la válvula máxima de 60% y % del aero se incrementó gradualmente para cada temperatura. Al inicio del experimento, el aero no estaba en marcha y T2 y T4 tienen el mismo valor. Cuando el aero se pone en marcha (12:00), el % de funcionamiento no es muy alto y produce una diferencia alrededor de los 2.5-3°C.

Por lo tanto atendiendo al análisis de la operación manual, se pueden establecer las exigencias requeridas al sistema de control que serán: i) consignas de temperatura en el rango de [60-80°C] con escalones de 5°C. ii) consignas de caudal fijas, dependiendo de la operación y con valores comprendidos en el rango de [8.3-10] l/min. Así, el cálculo del sistema de control se hará atendiendo a estas consideraciones y por tanto se requerirán controladores que sean capaces de trabajar en todo el rango de operación descrito.

4.2 Identificación de los modos de operación

Como se ha mencionado anteriormente y debido a las diferentes formas de alimentar el módulo MD, la planta puede ser operada en diferentes modos. Así, se han identificado 14 modos de operación en función de las posiciones de las válvulas, estado de funcionamiento de las bombas, resistencias eléctricas y aero. El objetivo es emplear siempre aquel modo que garantice que la operación sea lo más eficiente posible, intentando reducir al mínimo el uso de fuentes de energía convencionales como son el aero y las resistencias eléctricas del tanque y explotando al máximo la productividad del campo, contribuyendo a disminuir el gasto energético de la operación y aumentando la viabilidad de esta.

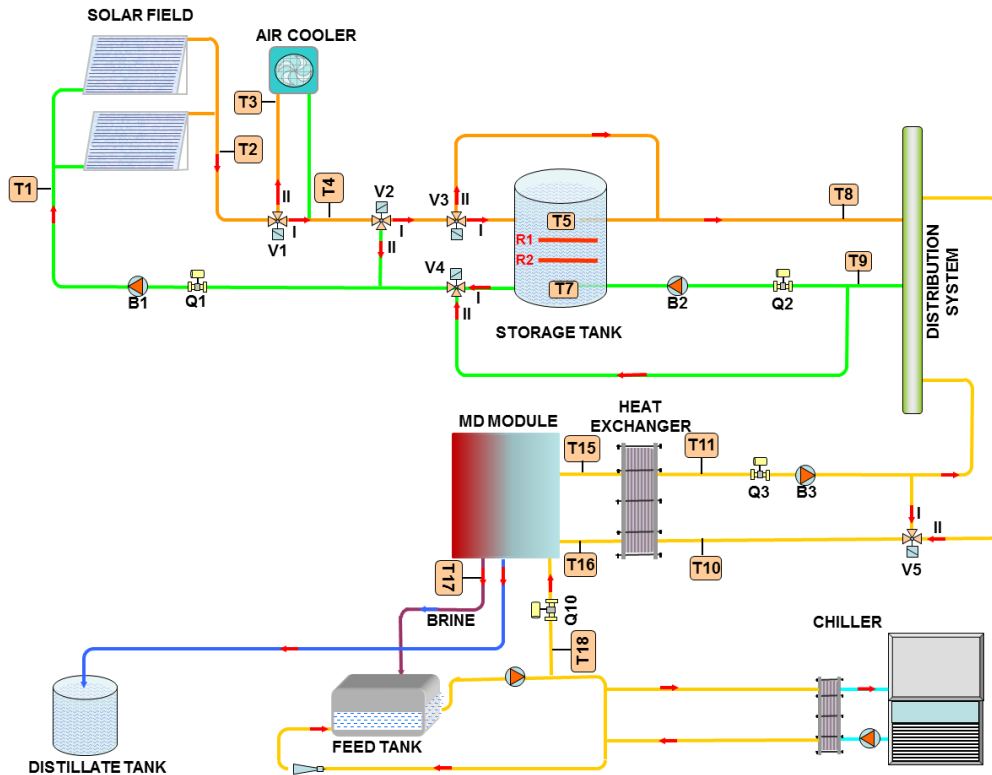


Figura 4.3. Diagrama esquemático de la instalación con las posiciones de las válvulas.

En la Tabla 4.1, se puede ver el estado de funcionamiento de los diferentes actuadores para cada modo, donde las posiciones de las válvulas están definidas de acuerdo con la Fig. 4.3 (posición I ó II). Las bombas, resistencias eléctricas y aerotermostato se definen con valor 0 ó 1 dependiendo si están apagadas o funcionando respectivamente.

Modo	V1	V2	V3 ^a	V5	B1	B2	B3	R ^b	Aero
1. Campo solar	I	II	-	-	1	0	0	0	0
2. Campo solar y resistencias eléctricas	I	II	-	-	1	0	0	1	0
3. Campo solar, carga de tanque	I	I	I	-	1	0	0	0	0
4. Campo solar y resistencias eléctricas, carga de tanque	I	I	I	-	1	0	0	1	0
5. Campo solar y descarga de tanque	I	II	-	I ^e	1	1	1	0	0
6. Campo solar y resistencias eléctricas, descarga de tanque	I	II	-	I ^e	1	1	1	1	0
7. Carga de tanque mediante campo solar	I	I	I	I ^e	1	1	1	0	0

Modo	V1	V2	V3 ^a	V5	B1	B2	B3	R ^b	Aero
y descarga									
8. Carga de tanque mediante campo solar, resistencias y descarga	I	I	I	I ^e	1	1	1	1	0
9. Acoplamiento directo	I	I	II	II	1	0	1	0	0
10. Acoplamiento directo y resistencias	I	I	II	II	1	0	1	1	0
11. Descarga de tanque	-	-	-	I ^e	0	1	1	0	0
12. Descarga de tanque y resistencias	-	-	-	I ^e	0	1	1	1	0
13. Acoplamiento directo con aerotermo	II ^c	I	II	II	1	0	1	0	1
14. Conexión parcial ^d	I	I	II ^c	II	1	1	1	0	0

- La posición de V4 es la misma que la de V3.
- Para simplificar, se considera que R1 y R2 tienen el mismo estado.
- Apertura de válvulas en el rango [0-100] %.
- Este módulo es válido solamente cuando en el campo la temperatura de salida sea alta y el caudal esté saturado, en B3 el caudal sea bajo (T10 no puede ser regulado con V5) y en el tanque haya la suficiente temperatura como para lograr la temperatura deseada (con $Q2 \geq Q3$).
- Apertura de válvulas en el rango [30-80] %.

Tabla 4.1. Modos de operación de la planta.

Descripción de los modos

Modo 1: Este modo se utilizará para elevar la temperatura de forma rápida recirculando el fluido constantemente por el campo sin estar el módulo MD en marcha.

Modo 2: En este caso se recirculará el fluido por el campo, a la vez que se eleva la temperatura del tanque mediante las resistencias, sin estar el módulo MD en marcha.

Modo 3: En este modo se recirculará el fluido por el tanque y el campo con el fin de elevar la temperatura del tanque hasta un valor adecuado para iniciar la operación.

Modo 4: Misma operación que en el modo 3 pero con un aporte extra de energía proporcionado por las resistencias para elevar la temperatura del tanque de forma más rápida.

Modo 5: Este modo se utiliza cuando la temperatura del tanque es lo suficientemente alta como para empezar a operar con él, mientras que el fluido se recircula por el campo hasta alcanzar la temperatura del tanque.

Modo 6: En este modo se hace la misma operación que en el modo 5, con el uso de las resistencias para mantener o incrementar la temperatura del tanque.

Modo 7: El aporte de energía térmica al módulo MD proviene del tanque que, a su vez, es alimentado con el campo solar.

Modo 8: En este modo se realiza la misma operación que en el modo 7, con el uso adicional de las resistencias.

Modo 9: En este caso, la energía térmica necesaria para alimentar el módulo MD proviene directamente del campo.

Modo 10: En este modo se operara con el campo en acoplamiento directo, mientras se calienta el tanque mediante las resistencias.

Modo 11: El módulo MD se alimenta como en el modo 5, pero sin circular agua por el campo.

Modo 12: El módulo MD se alimenta como en el modo 6, pero sin circular agua por el campo.

Modo 13: Este modo se utiliza cuando se opera en acoplamiento directo (Modo 9) y el caudal del campo se satura al máximo. Así, para bajar la temperatura de salida del campo, y mantener la temperatura a la entrada del módulo MD, es necesario circular el agua por el aereo.

Modo 14: En este modo se operará parcialmente en conexión directa con el tanque. Se regula V3 para controlar la temperatura de entrada al distribuidor (mezcla de agua procedente del campo solar y tanque). Para evitar que el tanque se desborde o se quede sin agua, la apertura de V4 será siempre la misma que la de V3.

Por tanto, una vez definidos todos los modos, los esquemas de control propuestos en este trabajo estarán dirigidos a operar con los Modos 9 y 13, ya que son los más utilizados en la operación manual (sección 4.1), dejando para trabajos futuros la implementación de un sistema automático a alto nivel que sea capaz de cambiar por los diferentes modos dependiendo de las condiciones de operación y de las exigencias requeridas.

4.3 Modelado dinámico del sistema

Como se ha explicado en la sección de metodología, se han utilizado tanto modelos físicos basados en primeros principios, como modelo en base a datos de entrada/salida. A continuación, se describirá de forma analítica y gráfica todos los modelos utilizados.

4.3.1 Modelado del campo solar

Para abordar las tareas de control en el campo solar, se han desarrollado tres tipos de modelos; i) modelo del campo solar (basado en primeros principios) ii) modelo de la temperatura de salida del campo T2 (basado en datos de entrada/salida) iii) modelo del caudal de entrada al campo Q1 (basado en datos de entrada/salida).

4.3.1.1 Modelo del campo solar

Este modelo se obtiene a partir del balance de energía planteado en la sección 3.3.2.2 y se utilizará para proporcionar un caudal nominal de operación en función de las condiciones de operación.

Como se ha mencionado anteriormente los parámetros H y β de la ecuación (3.21), que corresponden con el coeficiente global de pérdidas térmicas y el parámetro que modula la irradiancia, han sido identificados experimentalmente en base a datos de entrada reales (Fig. 4.4) empleando el modelo descrito en la ecuación (3.21) en una función de MATLAB, e importándola a *Simulink* (Fig. 4.5) mediante su paquete de funciones *S-function*.

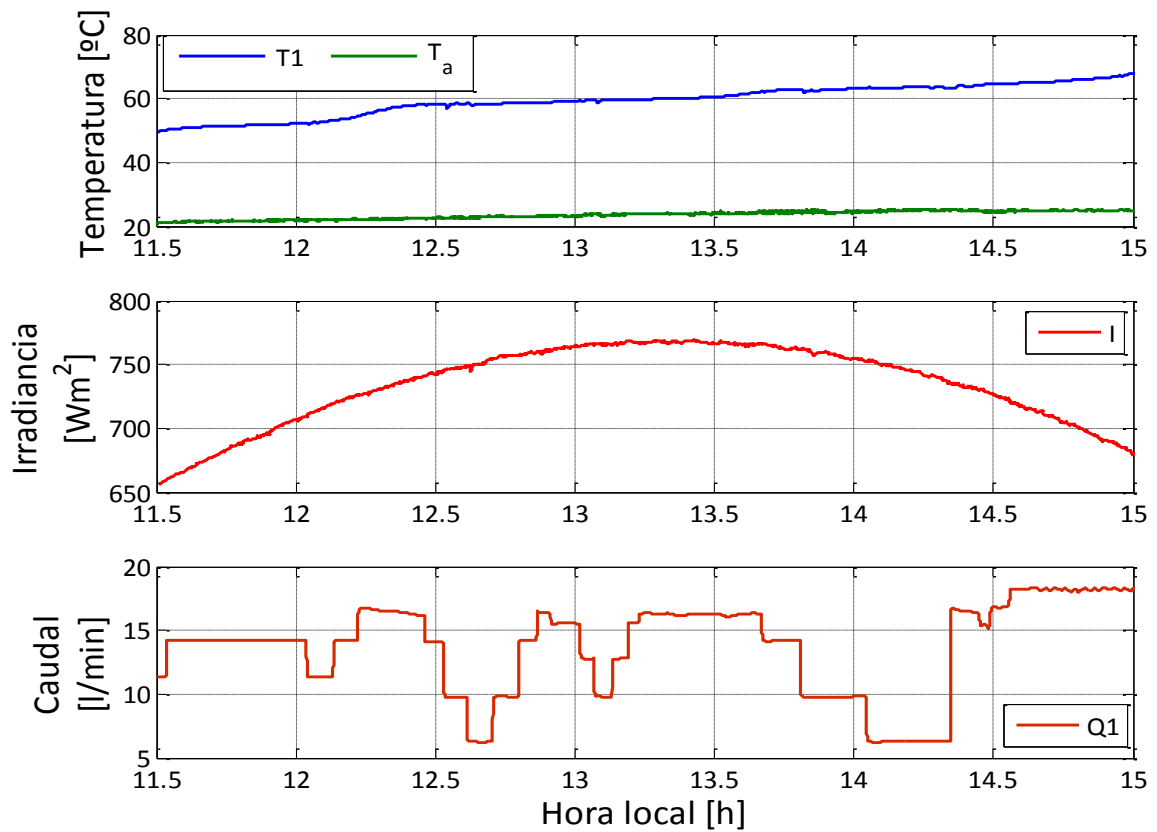


Figura 4.4. Datos de entrada para el modelo de caja negra del campo.

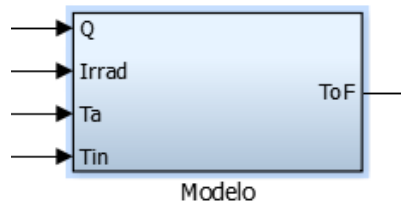


Figura 4.5. Parámetros para el modelo (Q: caudal, Irrad=I: irradiancia, Ta: temperatura ambiente, Tin=T1: temperatura de entrada, ToF=T2: temperatura de salida).

Por tanto, se han ido realizando diferentes ensayos con distintos valores de H y β de forma que la dinámica obtenida en el modelo sea lo más parecida posible a la dinámica del ensayo real. Los valores de H y de β con los cuales el modelo se ajusta más a los datos reales son 4.7 J/s/K y 0.123 m respectivamente. La salida que genera el modelo para estos valores en comparación con los datos reales se puede ver en la Fig. 4.6.

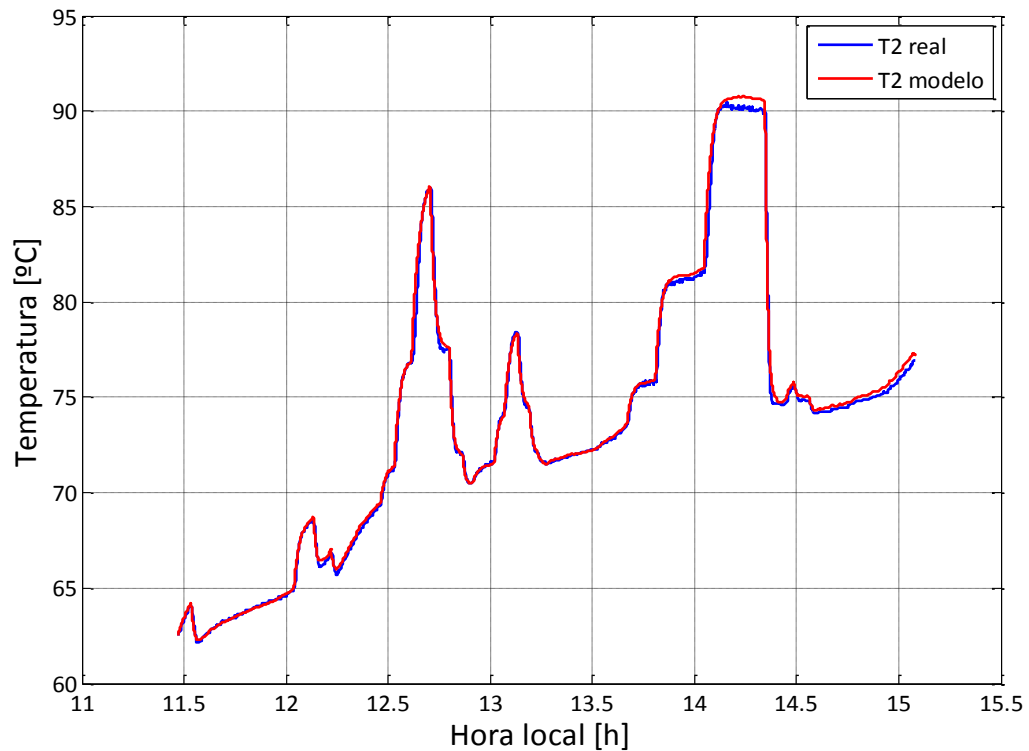


Figura 4.6. Comparación entre la temperatura de salida del modelo y la medida en el campo solar.

Se puede apreciar que el modelo obtenido se ajusta de forma bastante precisa a los datos reales, apreciándose diferencias mínimas en la dinámica y en la ganancia obteniendo un error máximo de 0.7°C . Estas diferencias pueden ser generadas por numerosos factores, desde dinámicas que introduzcan los sensores de medida y no estén contempladas en el modelo hasta el propio ruido de las variables que se introducen en él.

4.3.1.2 Modelo lineal de la temperatura de salida del campo T2

Este modelo relaciona el caudal de entrada al campo Q1 y la temperatura de salida T2 y ha sido ajustado mediante ensayos en lazo abierto en la planta, utilizando la librería de identificación *ident* de MATLAB. Para ello, se ha introducido un tren de escalones (Fig. 4.7) en el caudal de unos 3 l/min, obteniéndose respuestas típicas de primer orden con retardo en la salida en T2. Así, se han identificado 4 modelos cuyas respuestas en simulación se pueden ver en la Fig. 4.8.

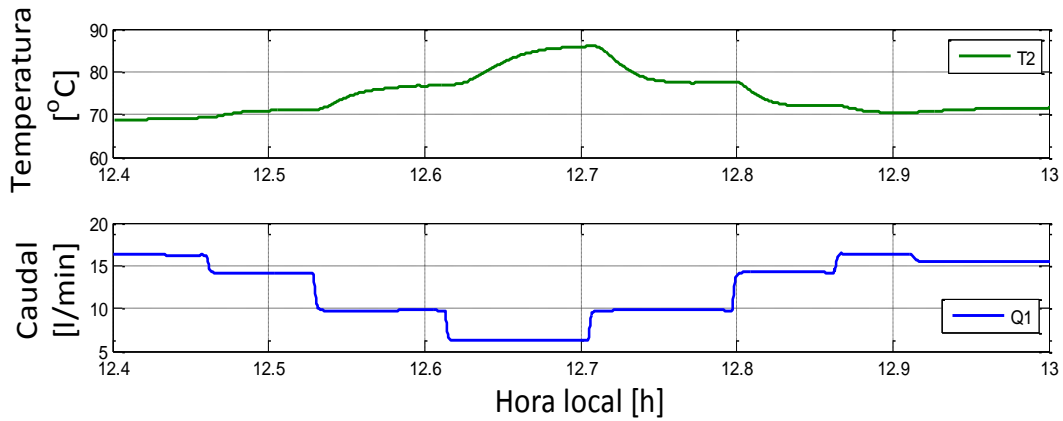


Figura 4.7. Ensayo para identificación del modelo para T2.

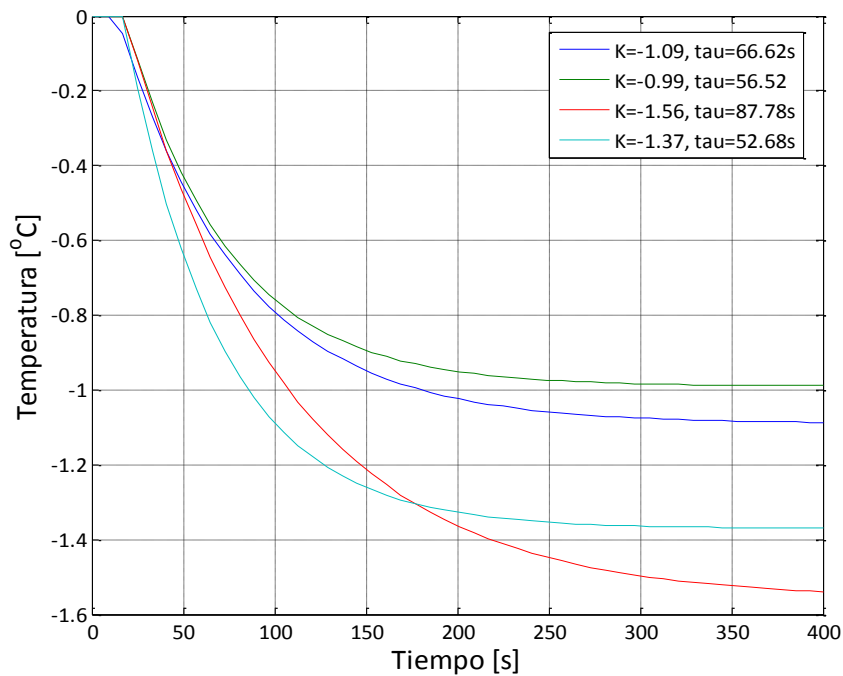


Figura 4.8. Respuesta a escalón unitario de los modelos obtenidos para T2.

Para la sintonización del control se ha utilizado un modelo en el rango medio de operación (modelo en azul en la Fig. 4.8), de forma que englobe toda la dinámica que presenta T2 con respecto al caudal. Además, el uso de este modelo se justifica atendiendo a que normalmente en la operación de la planta siempre se utilizan caudales en el rango de [11-16] l/min y solo se utilizarán caudales más bajos al inicio de la operación, para calentar rápidamente el fluido a través del campo, modo de operación que no se contempla en este trabajo. Así, los parámetros del modelo que se utilizará son:

$$G_{T2}(s) = \frac{T2(s)}{Q1(s)} = \frac{-1.37}{66.62s + 1} e^{-16s} \quad (4.1)$$

4.3.1.3 Modelo del caudal de entrada al campo Q1

Para terminar la caracterización completa del campo, se ha obtenido otro modelo que relaciona el caudal de entrada al campo Q1 respecto al tanto por ciento del variador de frecuencia de la bomba. El procedimiento seguido para la obtención de este modelo, es el mismo que en el caso anterior. Se ha introducido en la planta un tren de escalones en el variador de frecuencia de la bomba 1 (Fig. 4.9), obteniéndose dinámicas de primer orden con retardo en Q1.

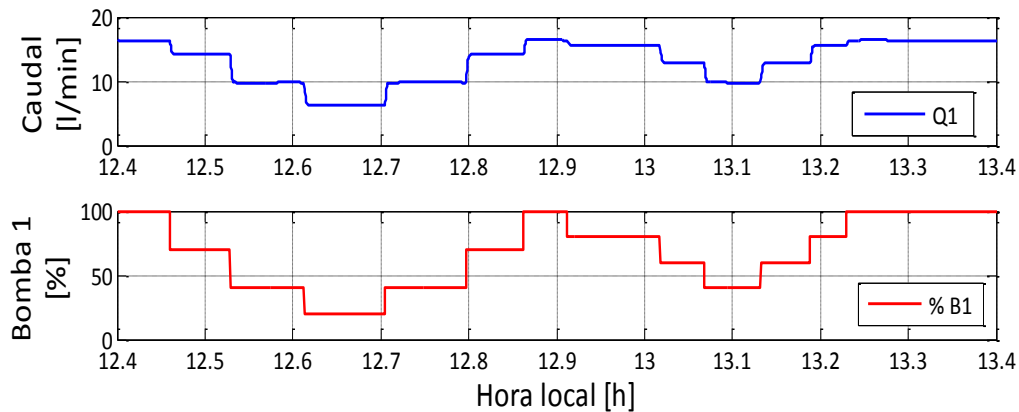


Figura 4.9. Ensayo para la identificación del modelo para Q1.

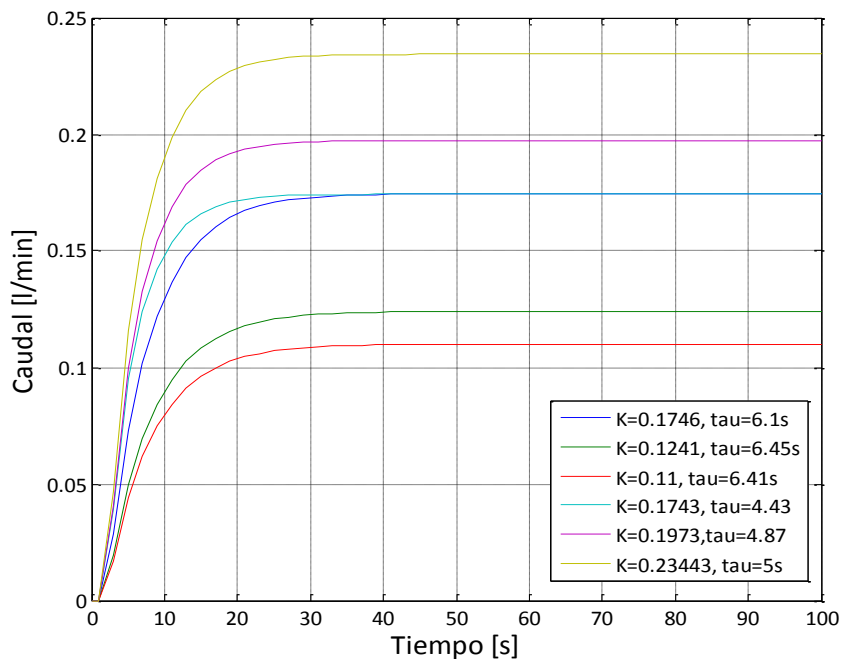


Figura 4.10. Respuestas a escalón unitario de los modelos obtenidos para Q1.

En este caso todos los modelos presentan dinámicas muy parecidas, y la diferencia entre ellos se encuentra sobre todo en términos de ganancia. Así, para la

sintonización del controlador se ha utilizado la dinámica del modelo en azul oscuro en la Fig. 4.10 situado en el rango medio y definido por los siguientes parámetros:

$$G_{Q1}(s) = \frac{Q1(s)}{\%B1(s)} = \frac{0.3344}{5s + 1} e^{-s} \quad (4.2)$$

4.3.2 Modelado del sistema aero-válvula

Para el sistema aero-válvula, el objetivo es obtener modelos de cada actuador por separado con respecto al decremento de temperatura que se produce entre T4 y T2. Esto es debido a que se trata de un sistema con dos entradas (V1 y aero) y una salida (diferencia entre T4 y T2) y por tanto se decidió evitar la manipulación simultánea de los dos actuadores, de forma que para minimizar el coste energético se actúa sobre la válvula V1 (saturando el aero a un mínimo fijado del 30%) y cuando V1 satura al máximo (100%) se actúa sobre la frecuencia del aero. Así, los dos modelos sacados serán: i) modelo de la válvula, con el aero saturado al mínimo (30%), con respecto al decremento de temperatura. ii) modelo del aero, con la válvula satura al máximo (100%), con respecto al decremento de temperatura.

4.3.2.1 Modelado de V1

Para realizar el modelado del decremento de temperatura con respecto al % de apertura de V1, se satura el aero al mínimo y se realizan escalones en V1 del 30 al 100% en distintos rangos de caudal, ya que este será una perturbación al lazo de control. En la figura también se observan cambios en el aero ya que este mismo test se ha empleado para modelar el aero como se verá en la sección anterior.

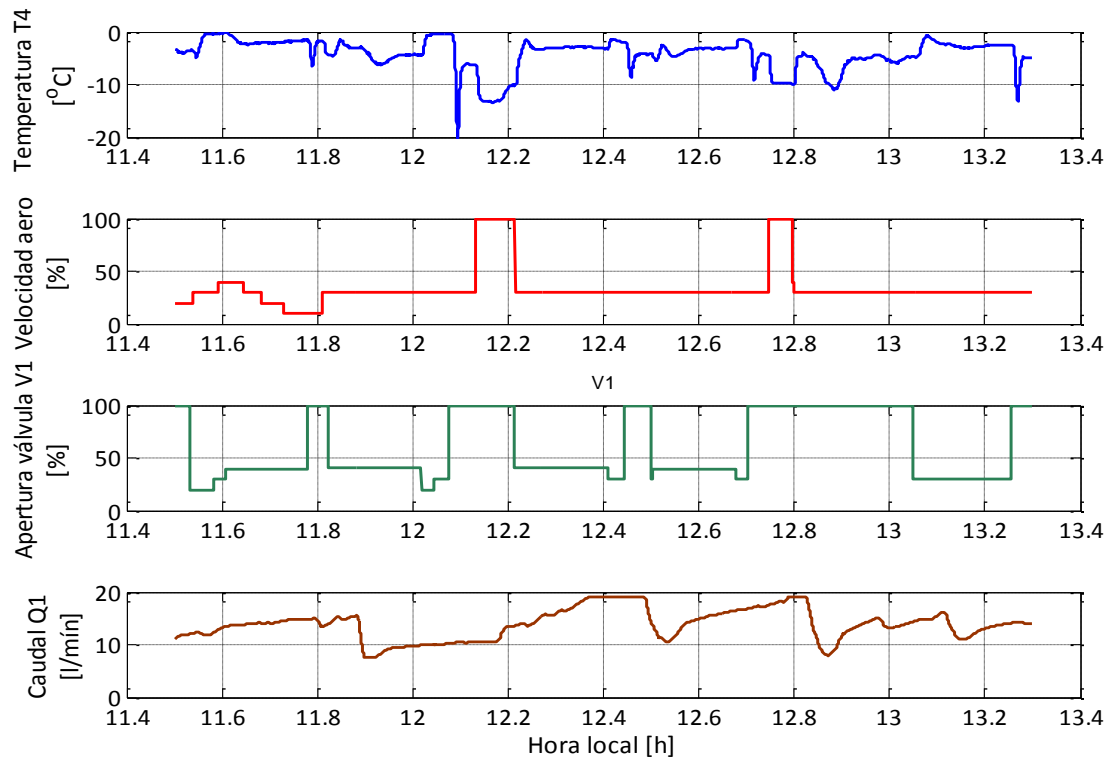


Figura 4.11. Ensayo en lazo abierto para el modelado de V1 y aerotermo.

Así, tras analizar la dinámica en lazo abierto obtenida en el ensayo, se ha decidido utilizar un sistema de tercer orden con un cero de fase no mínima dominante y con un retardo para caracterizar la dinámica, utilizando de nuevo la librería de identificación *ident* de MATLAB. A continuación en la Fig. 4.12 se pueden ver los tres modelos realizados a distintos rangos de caudal.

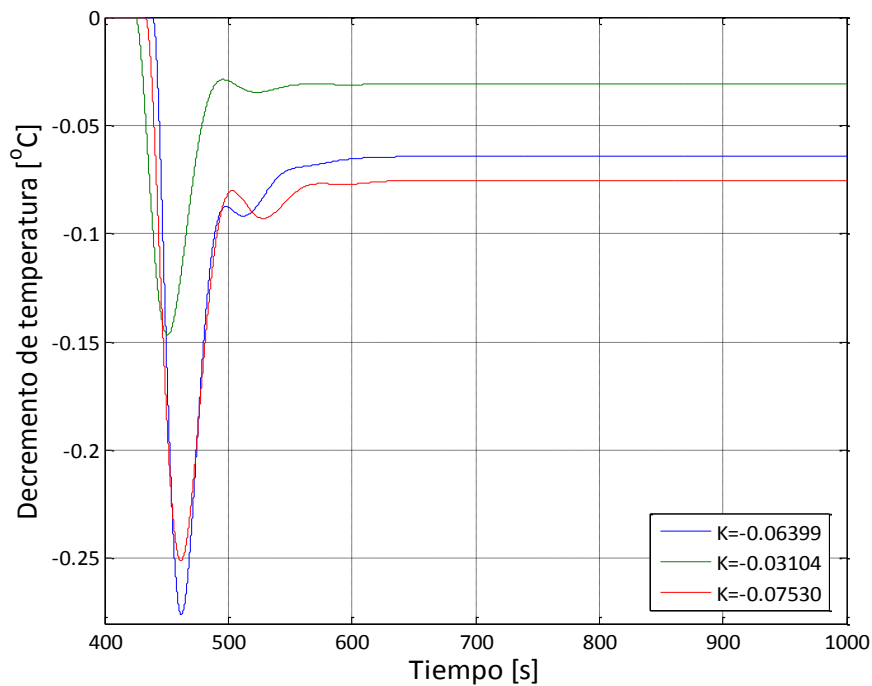


Figura 4.12. Respuesta ante escalón unitario de los modelos de V1.

Para este lazo debido a la dinámica que presenta, se opta por escoger el modelo más desfavorable para la implementación del lazo de control. Por tanto el modelo escogido es el azul, que además corresponde con el rango medio de caudal. Este modelo es el que presenta el cero más dominante y el que tiene más retardo de los tres y la función de transferencia que lo caracteriza se presenta a continuación.

$$G_{V1}(s) = \frac{\Delta T4(s)}{V1(s)} = \frac{-0.004594s - 3.15e - 5}{s^3 + 0.1327s^2 + 00185s + 0.0004923} e^{-39s} \quad (4.3)$$

4.3.2.2 Modelado del aerotermo

Para caracterizar la dinámica de la temperatura con respecto al % de funcionamiento del aerotermo, se satura la válvula al máximo y se realiza un escalón del 30 al 100% en la frecuencia del aerotermo, el ensayo en lazo abierto se puede ver en la Fig. 4.11. En este caso la dinámica que presenta el aerotermo se corresponde con una dinámica de primer orden con retardo. A continuación en la Fig. 4.13 se puede ver el comportamiento dinámico de los tres modelos realizados en simulación.

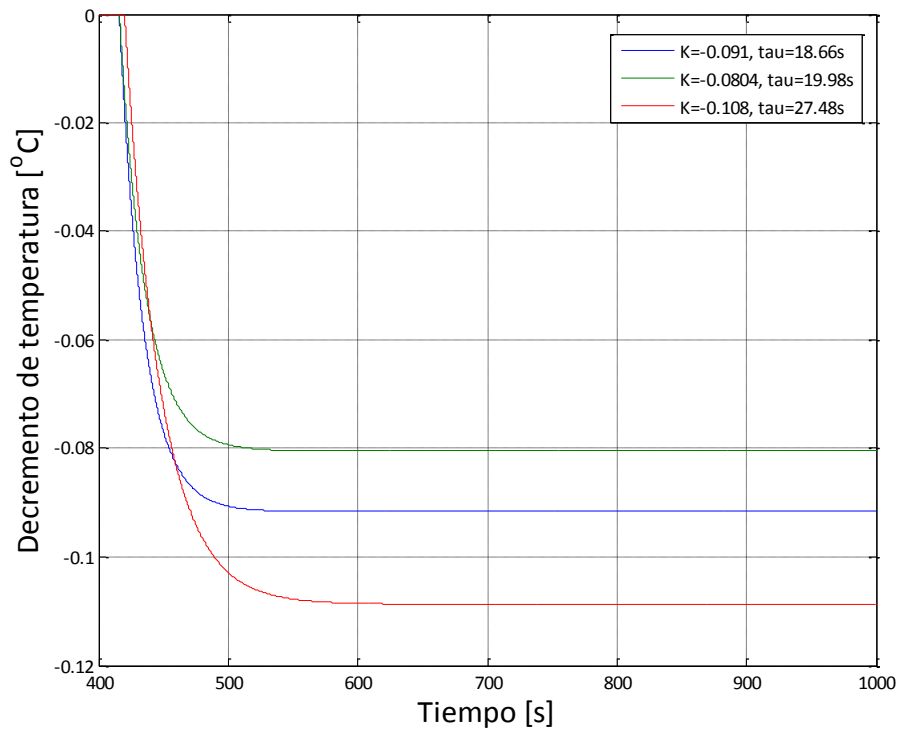


Figura 4.13. Respuesta ante escalón unitario de los modelos del aero.

Para la realización del bucle de control de nuevo se escoge el modelo situado en el rango medio correspondiente con el modelo en azul de la Fig. 4.13 cuya función de transferencia se presenta a continuación.

$$G_{fac}(s) = \frac{\Delta T4(s)}{\%Aero} = \frac{-0.1086}{27.48s + 0.03639} e^{-20s} \quad (4.4)$$

4.3.3 Modelado de las variables de entrada al módulo MD

El último sistema a modelar es el de las variables de entrada al módulo MD. En este caso, para la implementación de un lazo de control en esta parte de la planta, hay dos actuadores automáticos los cuales se pueden manipular; la bomba B3 y la válvula V5. Así, se realizará un modelo de Q3 con respecto al variador de frecuencia de la bomba B3 y un modelo de T10 con respecto a la apertura de la válvula V5. Estos modelos se han caracterizado en base a datos de entrada/salida mediante identificación por mínimos cuadrados. Además, en esta parte se debe tener en cuenta también el modelado físico de la válvula V5 descrito en la sección 3.3.2.2 a la hora de la implementación del bucle de control.

4.3.3.1 Modelado del caudal de entrada al módulo MD Q3

Para caracterizar el caudal Q3, se ha realizado el mismo tipo de ensayo que para la caracterización de Q1, el cual se puede ver en la Fig. 4.14.

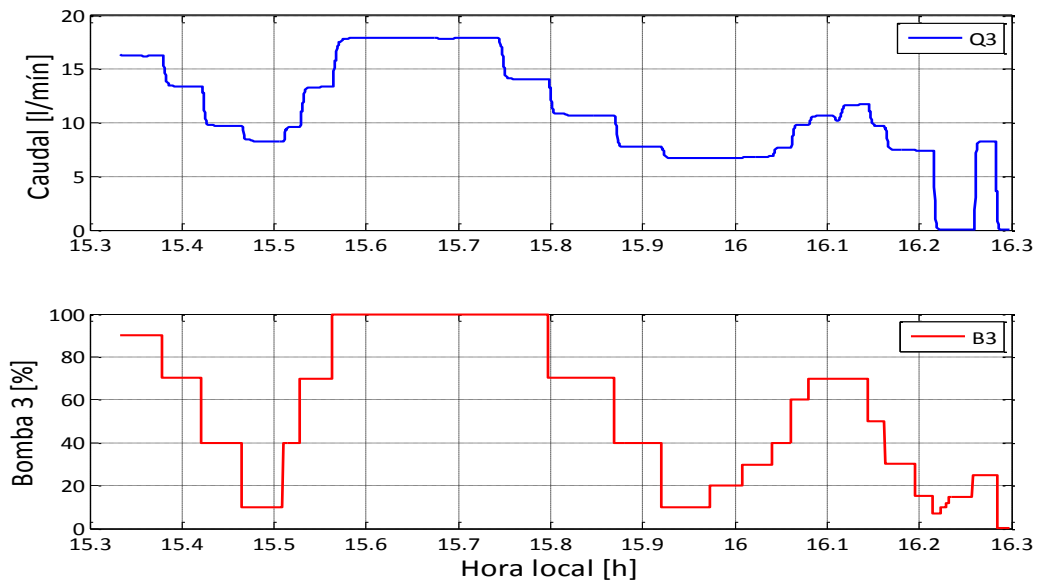


Figura 4.14. Ensayo en lazo abierto para la caracterización de Q3.

Así, la dinámica a la que responde Q3 para entradas en escalón del 30% en el variador de frecuencia de B3 es de primer orden con retardo. La simulación de los modelos caracterizados se puede ver a continuación en la Fig. 4.15.

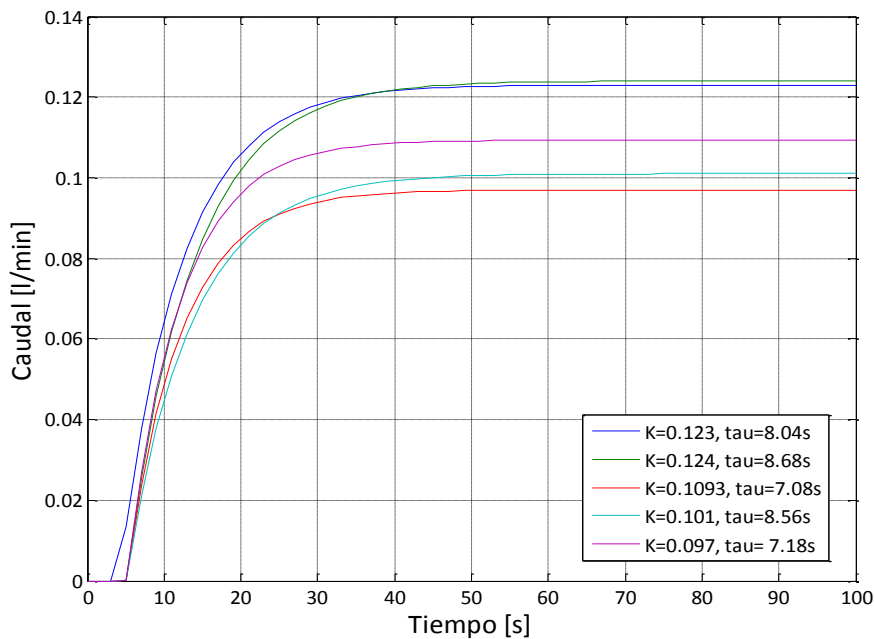


Figura 4.15. Respuesta a escalón unitario de los modelos caracterizados.

Por tanto, nuevamente se escoge el modelo situado en el rango central para realizar el sistema de control, cuya ecuación de transferencia es:



$$G_{Q3}(s) = \frac{Q3}{\%B3} = \frac{0.123}{8.04s + 01} e^{-3s} \quad (4.5)$$

4.3.3.2 Modelado de la temperatura de entrada al módulo MD T10

Para la caracterización de T10 con respecto a la apertura de V5 se han realizado trenes de escalones en V5 para ver el efecto sobre la temperatura (Fig. 4.16).

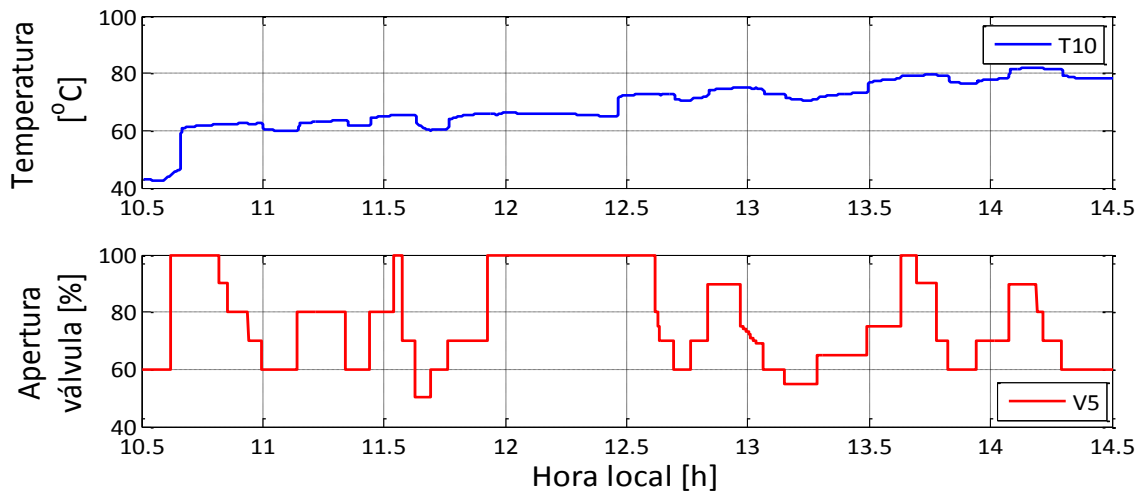


Figura 4.16. Ensayo en lazo abierto para la caracterización de T10.

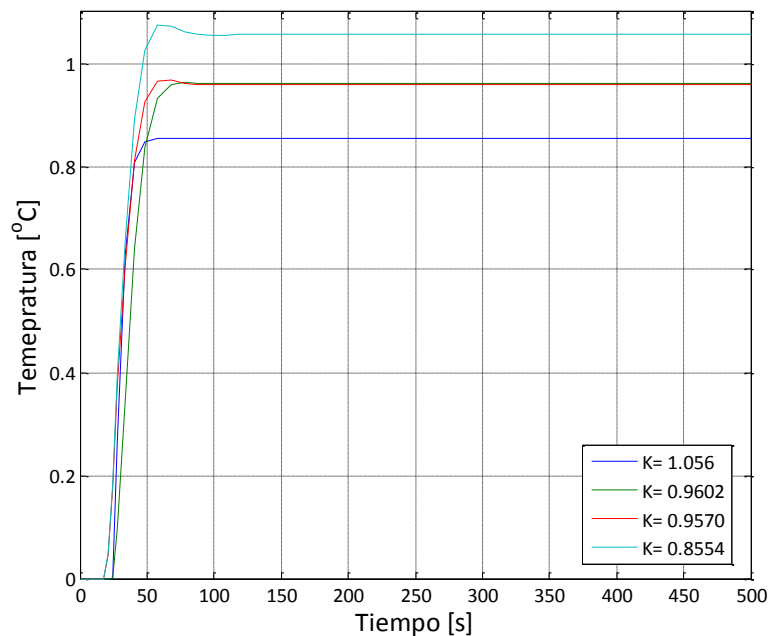


Figura 4.17. Respuesta a escalón unitario de los modelos para T10.

En este caso se deben tener varias consideraciones en base a los resultados del ensayo en lazo abierto y es que el efecto de la apertura de V5 en la temperatura T10 no es tan

inmediato como en el caso de V1 además, dicho efecto solo se aprecia para escalones comprendidos entre [50-80]% de la apertura de la válvula. Por tanto, aunque la tarea de identificación en este caso no ha sido sencilla, se han identificado varios modelos de segundo orden (Fig 4.17) con retardo en este rango. Así, para la implementación del sistema de control se utilizará el modelo correspondiente a la traza roja en la Fig. 4.17 cuyos parámetros se presentan a continuación.

$$G_{T10}(s) = \frac{T10(s)}{\%V5(s)} = \frac{0.01457}{s^2 + 0.202s + 0.01521} e^{-20s} \quad (4.6)$$

4.4 Esquemas de control en simulación

En este trabajo se han diseñado e implementado en la planta tres bucles de control (Fig. 4.18), dejando el modelado y control del bucle 4 para trabajos futuros. Estos bucles están dirigidos a operar en los modos 9 y 13 descritos anteriormente, con los objetivos de mantener la temperatura y el caudal de entrada al módulo en unos valores determinados y en los rangos establecidos en el análisis de la operación manual (sección 4.1). Pero antes de implementarlos en la planta se ha pasado por una fase de simulación utilizando *Simulink*. Esta fase es necesaria en cualquier proyecto de control, con el objetivo de ver factores como la robustez de los controladores y tiempo de respuestas en lazo cerrado.

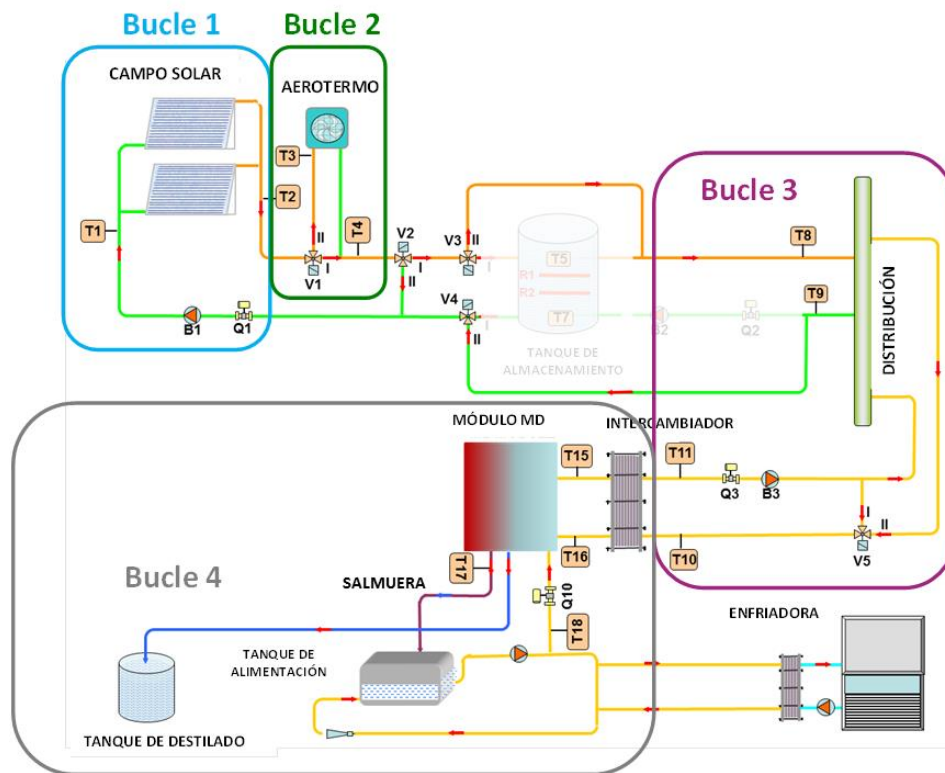


Figura 4.18. Diagrama esquemático de la instalación con los lazos de control.

Hay que hacer notar que las funciones de transferencia que se han utilizado para los controladores PID son las ideales $C(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i}s + T_d s)$.

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

Para el control de la temperatura de salida, 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 y el maestro que proporciona el caudal demandado a la bomba para conseguir una temperatura de salida deseada en el campo solar. Como se ha comentado anteriormente, este esquema se ha complementado con un control por adelanto en configuración paralela, basado en el modelo del campo solar (sección 3.3.2.2) que tendrá en cuenta las perturbaciones a las que está sometido el sistema: temperatura de entrada al campo solar T_1 , temperatura ambiente T_a e irradiancia solar I . Este control por adelanto proporciona el caudal nominal de operación $Q1_{FF}$ en función de las condiciones de operación. Así, el esquema de control integro implementado se puede ver en la Fig. 4.19.

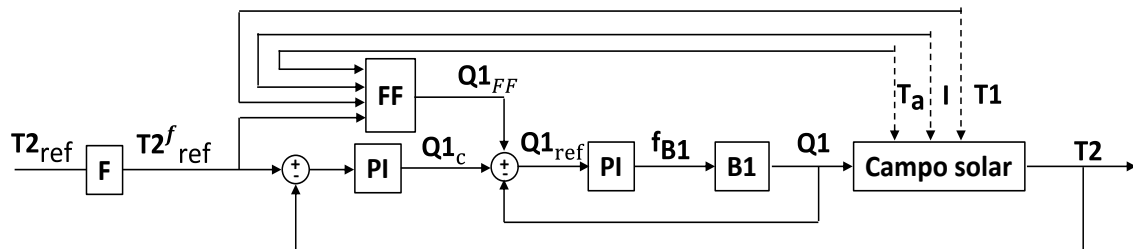


Figura 4.19. Esquema de control del bucle 1. Temperatura de salida del campo.

Para configurar el control en cascada, la primera tarea de diseño consiste en la sintonización del PI esclavo. De esta forma, se ha diseñado un controlador robusto con el fin de obtener una buena respuesta dinámica en todo el rango de operación. El método de sintonización empleado para este lazo es el método *Improved SimC* que proporciona una $K_p = 2.84 \text{ min/l-\%}$ y $T_i = 0.082 \text{ min}$ haciendo $\tau_{bc} = 0.85\tau$. Se ha decidido utilizar este método a pesar de que el tiempo de retardo normalizado es menor a 0.4 ya que proporciona la robustez que se persigue en todos los lazos de control de la planta.

En la Fig. 4.20 se puede observar que se obtienen buenas respuestas en lazo cerrado para todos los modelos caracterizados anteriormente. Además, las señales de control no son agresivas, lo que garantiza que no habrá saltos bruscos en los actuadores y también proporciona un cierto margen de mejora en trabajos futuros, ya que estas señales se pueden modificar mejorando los tiempos de respuesta aumentando la acción proporcional del controlador.

Así, como se ha mencionado anteriormente en el apartado de revisión bibliográfica la única especificación de diseño para el correcto funcionamiento de la configuración en cascada, es que la dinámica del PI esclavo sea al menos 5 veces más rápida que la del maestro. En este caso la dinámica en lazo abierto de ambas variables ya cumplía con este requisito y por tanto se ha optado por poner la misma especificación en lazo cerrado a las dos, ya que se han calculado por el mismo método (*Improved SimC*), $\tau_{bc} = 0.85\tau$. Los parámetros para el PI maestro son $K_p = -0.42 \text{ min/l}\%$ y $T_i = 1.21 \text{ min}$.

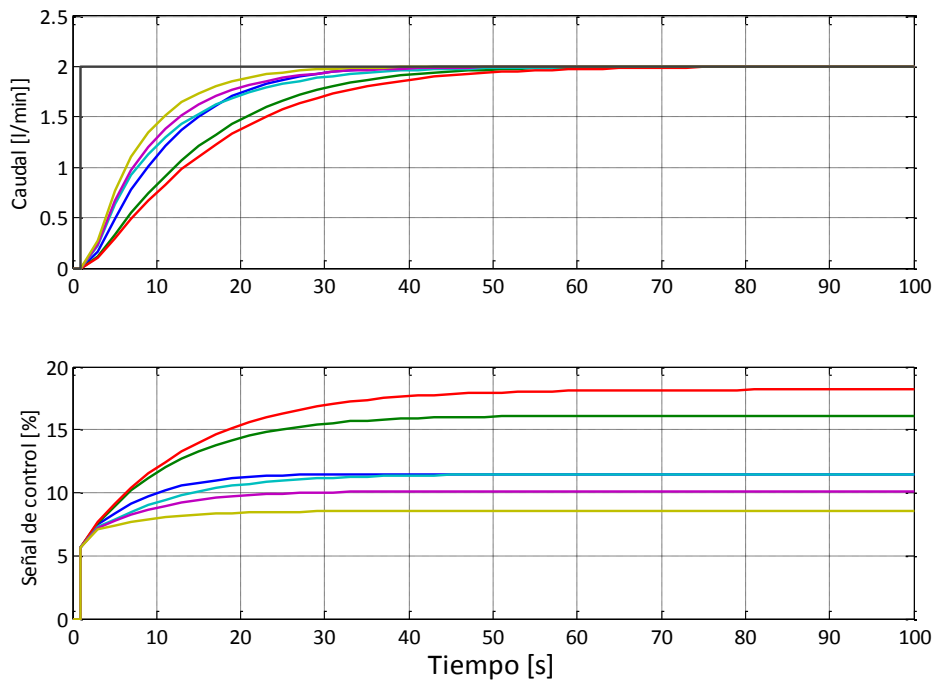


Figura 4.20. Respuesta en lazo cerrado PI esclavo.

En la Fig. 4.21 se puede ver la respuesta en lazo cerrado del PI maestro. Como en el caso anterior se obtiene una buena respuesta para todas las dinámicas modeladas con señales de control suaves.

El control por adelantado se define por la ecuación (4.7) y se acopla directamente al esquema de control de la planta real, ya que ya se ha validado experimentalmente el valor de sus parámetros.

$$Q1_{FF}(t) = \left[\frac{\beta \cdot L_{eq}}{C_p \cdot (T2^f_{REF}(t) - T1(t))} \cdot I(t) - \frac{H}{C_p} \cdot \frac{(\tilde{T}(t) - T_a(t))}{(T2^f_{REF}(t) - T1(t))} \right] \cdot \frac{c_f}{\rho} \quad (4.7)$$

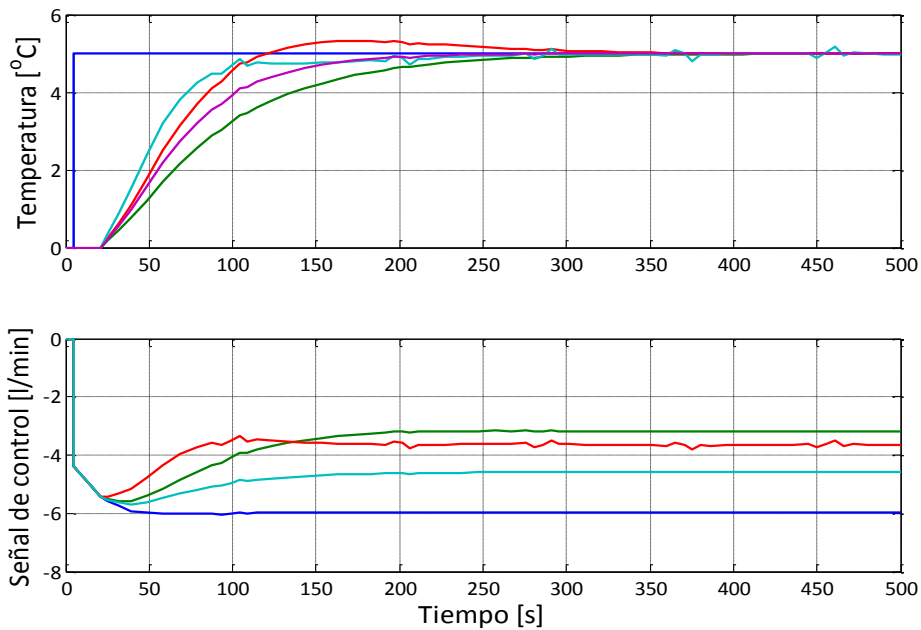


Figura 4.21. Respuesta en lazo cerrado PI maestro.

4.4.2 Bucle 2: Control de la temperatura de mezcla aero-campo solar

El objetivo de este bucle de control es alcanzar una temperatura deseada en T4 cuando T2 tiene una temperatura superior a la referencia dada, debido a que el caudal Q1 está saturado o debido a oscilaciones causadas por perturbaciones que no puede compensar completamente el bucle 1. Para la implementación de este bucle, como se ha mencionado anteriormente, se ha decidido manipular las dos variables de entrada por separado (apertura de V1 y aero) de forma que para minimizar el coste energético de la operación se actúa sobre la válvula (con el aero saturado al mínimo 30%) y cuando la válvula se satura al máximo se actúa sobre la frecuencia de funcionamiento del aero.

El esquema de control propuesto (Fig. 4.22) contiene dos bucles que incluyen un predictor de Smith filtrado, donde los filtros sobre el error de estimación de la salida (FTP01 y FTP02) son de primer orden, dos controladores PI, dos términos para desacoplar o compensar las perturbaciones que cada bucle provoca sobre el otro en el momento de la conmutación (FF12 y FF21), un bloque de conmutación con transferencia sin saltos para cambiar de un controlador a otro y un generador de consignas.

El esquema de control ha sido diseñado en base a los modelos caracterizados en el apartado anterior para V1 y aero. De forma que el uso del predictor de Smith se

justifica debido a que las dos funciones de transferencia presentan retardo dominante con respecto a su dinámica.

El generador de consignas se utiliza para crear referencias adecuadas para cada actuador (al ser estos implementados en forma de modelo de perturbaciones en torno a un punto de trabajo) en base al caudal $Q1$, temperatura $T2$ y a la $T4_{REF}$. Así, a este bloque le entra como parámetro de entrada $T2$ y si es superior a la $T2_{REF}$ (referencia del bucle 2) empieza a generar consignas para bajarla igualando $T4_{REF} = T2_{REF}$. A pesar de que este bucle está pensado para funcionar en los casos en los cuáles el caudal $Q1$ esté saturado, este presenta variaciones aun encontrándose en esa situación. Por tanto, a este bloque también se le pasa como parámetro de entrada la medida de caudal y este lo tiene en cuenta debido a que tiene implementado el valor en estacionario de los tres modelos caracterizados de $V1$ en la sección anterior, de forma que cuando se conmuta de controlador, a la consigna que se le pasa al aero se le resta el estado estacionario del modelo de $V1$ correspondiente al rango de caudal en el que se encuentre. Hay que hacer notar que las consignas que se generan están en forma de decrementos de temperatura ($T4_{REF} - T2$), ya que como se ha visto en la sección anterior los modelos se han caracterizado en base a los decrementos de temperatura. Este generador ha sido implementado mediante una función de MATLAB y se ha importado a *Simulink* utilizando el bloque de funciones *MATLAB-Function*.

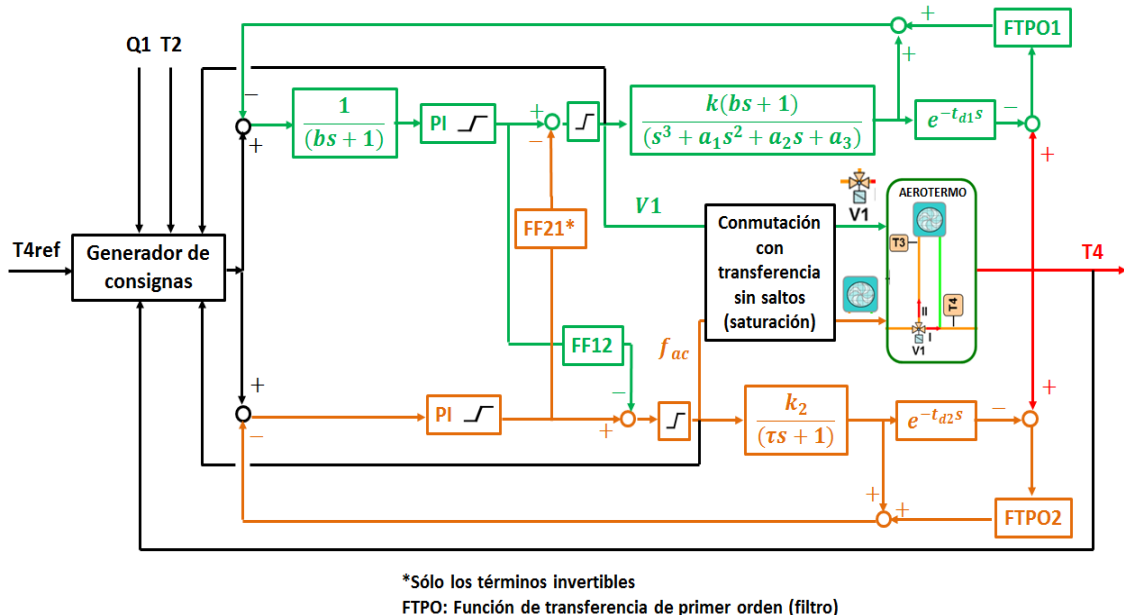


Figura 4.22. Esquema de control del bucle 2. Temperatura de mezcla aero-campo solar.

El mecanismo de conmutación entre controladores es simple ya que se hace en base a las saturaciones. Primero se actúa sobre $V1$ y una vez que esta entra en saturación (100%) se hace la conmutación hacia el aero. Además, se incluye el mecanismo de transferencia sin saltos que resetea la acción integral del controlador ya que en el

momento de la conmutación los actuadores pasan a trabajar de lazo abierto a lazo cerrado.

Los bloques de filtro sobre el error de estimación en el predictor de Smith (FTP01 y FTP02) se utilizan para intentar eliminar los errores producidos por la incertidumbre de modelado, sobre todo en el caso del bucle de V1 en el cual se utiliza un modelo de orden alto. La constante de tiempo para el filtro FTP01 es de 0.1s y la de FTP02 es de 1 segundo.

Los controladores por adelantado se utilizan para eliminar las perturbaciones que cada actuador ejerce sobre el otro en el momento del cambio. Así, FF12 no presenta problemas ya que todos los términos son invertibles y su resultado se puede ver en la ecuación (4.8). Sin embargo en el caso de FF21, todos los términos son no invertibles y por tanto solo se puede utilizar la ganancia para intentar compensar la perturbación de forma que se ha decidido implementar solo el FF12 para este trabajo, ya que los resultados de FF21 con los términos no invertibles no mejoran los resultados que se obtienen sin incluir este bloque.

$$FF12(s) = \frac{\%V1}{\%aero} = \frac{1.16s^2 + 0.05s + 0.00028}{s^3 + 0.1327s^2 + 0.0185s + 0.00049} e^{-19s} \quad (4.8)$$

Para el diseño de los controladores PI se han tenido en cuenta los modelos sin el retardo debido a la utilización del predictor de Smith. Así para el caso del aero se ha diseñado un controlador tipo PI por el método de cancelación polo-cero con una especificación en lazo de cerrado de $\tau_{bc} = 0.8\tau$ obteniendo los siguientes parámetros: $K_p = -11.39 \%/^{\circ}\text{C}$ y $T_i = 0.4567 \text{ min}$.

Para el caso de V1 en la Fig. 4.23 se puede ver el lugar de las raíces del modelo obtenido. El controlador que se ha decidido implementar es de tipo PI con un filtro, de forma que el filtro se utiliza para eliminar el cero dominante que presenta el modelo. Este filtro es paso bajo y la constante de tiempo que lo caracteriza es de 144.92 segundos. Para el diseño del PI, se ha utilizado la parte integral para eliminar el polo más dominante de forma que su valor es de $T_i = 30.95$ segundos. Por último, el último grado de libertad que nos queda para ajustar la respuesta dinámica en lazo cerrado deseada es la acción proporcional que tendrá un valor de $K_p = -8.69 \%/^{\circ}\text{C}$ y ha sido ajustada analizando las respuestas que se obtenían en lazo cerrado para varios valores.

Para analizar los resultados obtenidos en este lazo, primero se analizará la respuesta sin introducir el control por adelantado en la planta y después se introducirá para ver la efectividad de este.

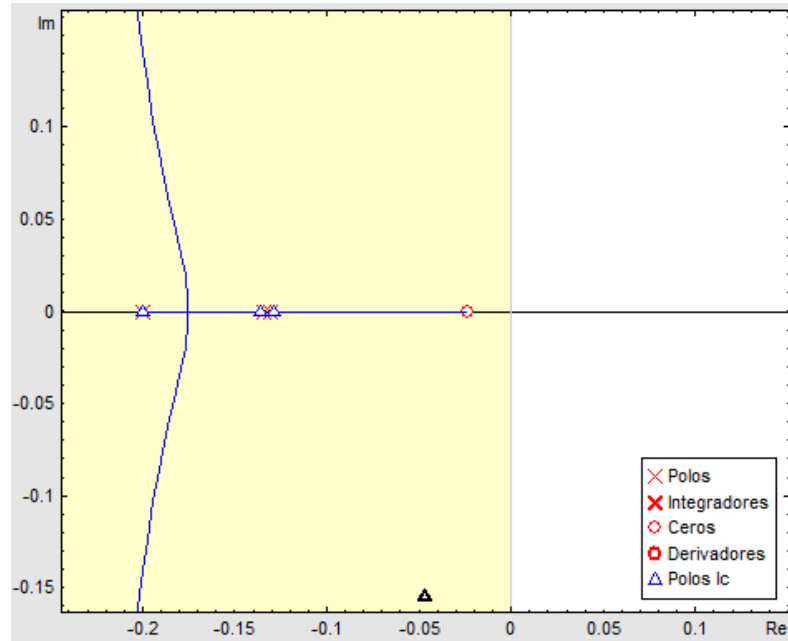


Figura 4.23. Lugar de las raíces del modelo de V1.

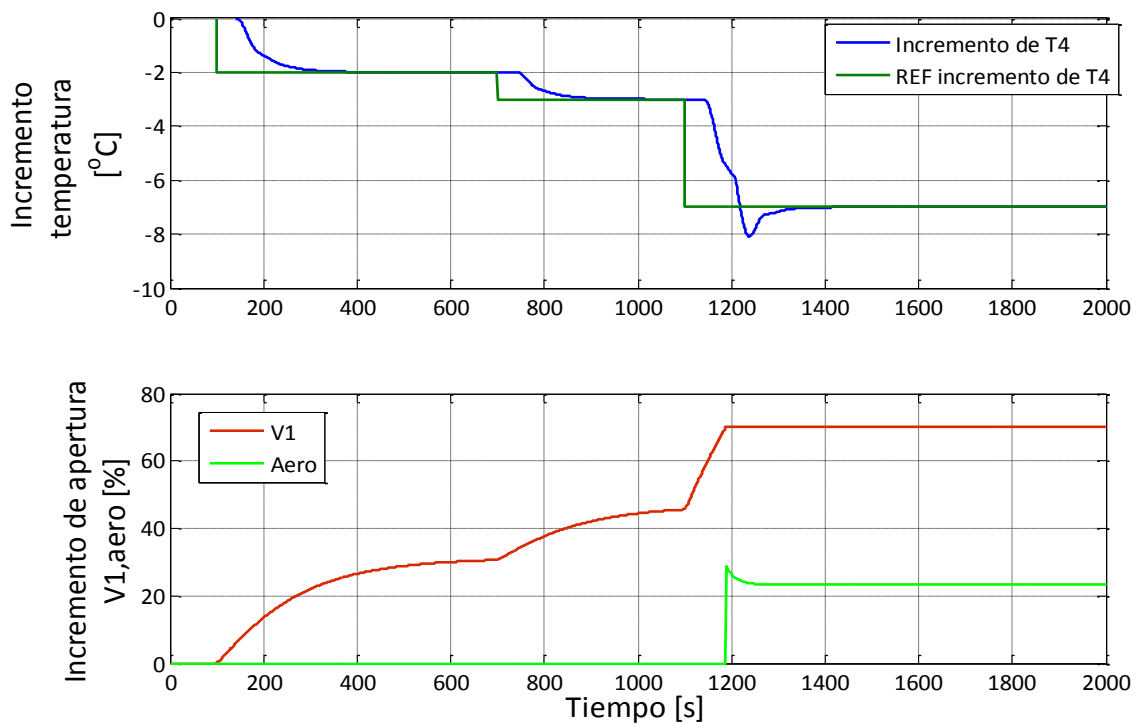


Figura 4.24. Respuesta en lazo cerrado del esquema de control sin control por adelantado.

En la Fig. 4.24 se puede ver la respuesta en lazo cerrado del bucle de control sin incluir el control por adelantado. Para realizar una prueba en todo el rango se han introducido varios escalones de forma que en los dos primeros se utiliza para regular la temperatura solo la válvula V1 y se mantiene el aero saturado al mínimo como se puede apreciar. El valor de saturación del aero en la gráfica está en 0%, pero en la

planta real es del 30%, aquí está en cero porque se trabaja con sistemas lineales. Una vez que se realiza el último escalón, la nueva consigna hace que la válvula se satura al máximo (70% en la gráfica, 100% en la realidad) y se produzca la conmutación entre los lazos de control en el instante $t = 1187s$. Así, la válvula se mantiene saturada al máximo y se comienza a regular con el aero.

El principal inconveniente se presenta a la hora de la conmutación ya que cuando V1 se satura al máximo la salida de su lazo de control pasa a estar en lazo abierto y por tanto se reproduce la dinámica de lazo abierto a la salida de la temperatura, con el cero dominante que tiene como consecuencia una sobreoscilación en la temperatura que se puede apreciar desde el instante $t = 1187s$ hasta el $t = 1400s$. Para contrarrestar este efecto se utiliza el controlador por adelanto de la ecuación (4.8), el cual solo actúa a partir del instante en el que se produce la conmutación.

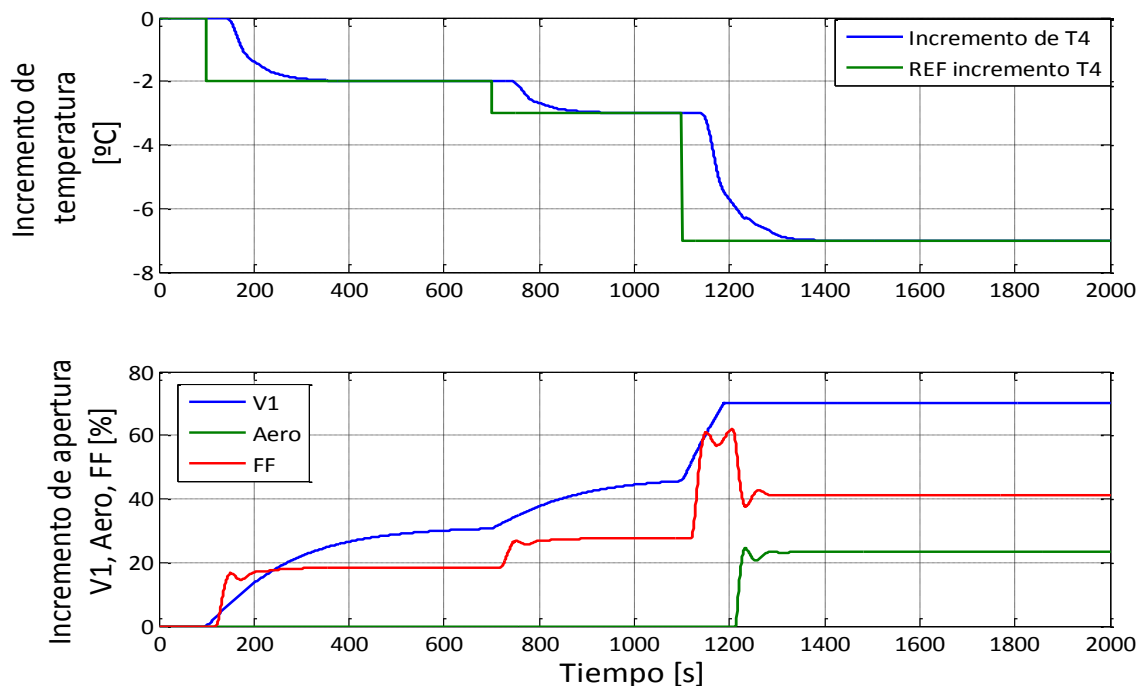


Figura 4.25. Respuesta en lazo cerrado del esquema de control con control por adelanto.

Así, una vez introducido el control por adelanto en el sistema se realiza la misma prueba que en el caso anterior. La conmutación nuevamente se realiza en el instante $t = 1187s$, pero en este caso, cuando se satura la señal de control de la válvula, la señal del control por adelanto entra en juego contrarrestando la dinámica de lazo abierto de V1. Analizando las señales de control, el control por adelanto reproduce el efecto de la dinámica en lazo abierto de V1 y al entrar en el lazo restando a la señal proporcionada por el controlador, hace que la señal de control que entra al aero no sea directamente la típica señal de un controlador tipo PI, como se producía en el caso anterior. De forma que se obtiene una respuesta suave y que mantiene la dinámica de primer orden que se presenta en los primeros escalones.

4.4.3 Bucle 3: Control de caudal y temperatura a la entrada del módulo

Para controlar la temperatura (T10) y el caudal (Q3) de entrada al módulo MD se ha optado por un esquema de control más simple que en el caso del bucle 2. Como se ha mencionado anteriormente en el análisis de la planta en operación manual, en la actualidad se trabaja fijando el caudal Q3 a un valor igual a Q10, que es el caudal de alimentación de agua salada al módulo MD. De esta forma, fijando esta igualdad el gradiente de temperatura en el intercambiador de calor se mantiene constante con un valor de unos 8.5°C. Por tanto, se controla el caudal de la bomba B3 mediante un controlador PI (actuando sobre el variador de frecuencia de ésta) de forma que Q3=Q10 y T10 se controla variando la posición de la válvula a tres vías V5. Las perturbaciones a este lazo de control son: Q3 (que se mantiene constante), T8 (temperatura de entrada al bucle) y T11 (temperatura de retorno del intercambiador). Hay que hacer notar que siempre que se trabaje en los modos 9 ó 13, la válvula V5 esté abierta completamente y Q2>Q3, T10≈T4 de forma que la temperatura de entrada al módulo se puede controlar mediante el bucle 2.

Así, igual que en los bucles anteriores, se han diseñado controladores tipo PI y PID basándose en los modelos obtenidos en los ensayos en lazo abierto. Para el caso del control de caudal se ha establecido un lazo simple con un controlador tipo PID sintonizado mediante el método AMIGO cuyos parámetros son: $K_p = 5.93 \text{ \%}\cdot\text{min/l}$, $T_i = 0.124 \text{ min}$ y $T_d = 0.024 \text{ min}$. En la Fig. 4.26 se puede ver la respuesta de las distintas dinámicas caracterizadas en lazo cerrado así como las señales de control. Se puede apreciar que el controlador se comporta de forma robusta y presenta una respuesta buena y suave para todas las dinámicas modeladas en todo el rango de operación.

Para el caso del control de la temperatura de entrada al módulo T10 se utiliza un controlador PI que se complementa con el control por adelanto calculado en el modelado físico de la válvula V5. Así, en la Fig. 4.27 se muestra el esquema al completo.

El controlador PI se ha sintonizado mediante el método *Improved SimC* obteniendo como parámetros: $K_p = 2.22 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ y $T_i = 0.5 \text{ min}$. El controlador por adelanto que se incluye a este lazo se muestra en la ecuación (4.9) y se encargara de rechazar las perturbaciones comentadas anteriormente, aunque este se incluirá directamente en la planta real.

$$v_{5,FF}(\%) = \frac{T_{10,ref} - T_{11}}{T_8 - T_{11}} \cdot 100 \quad (4.9)$$

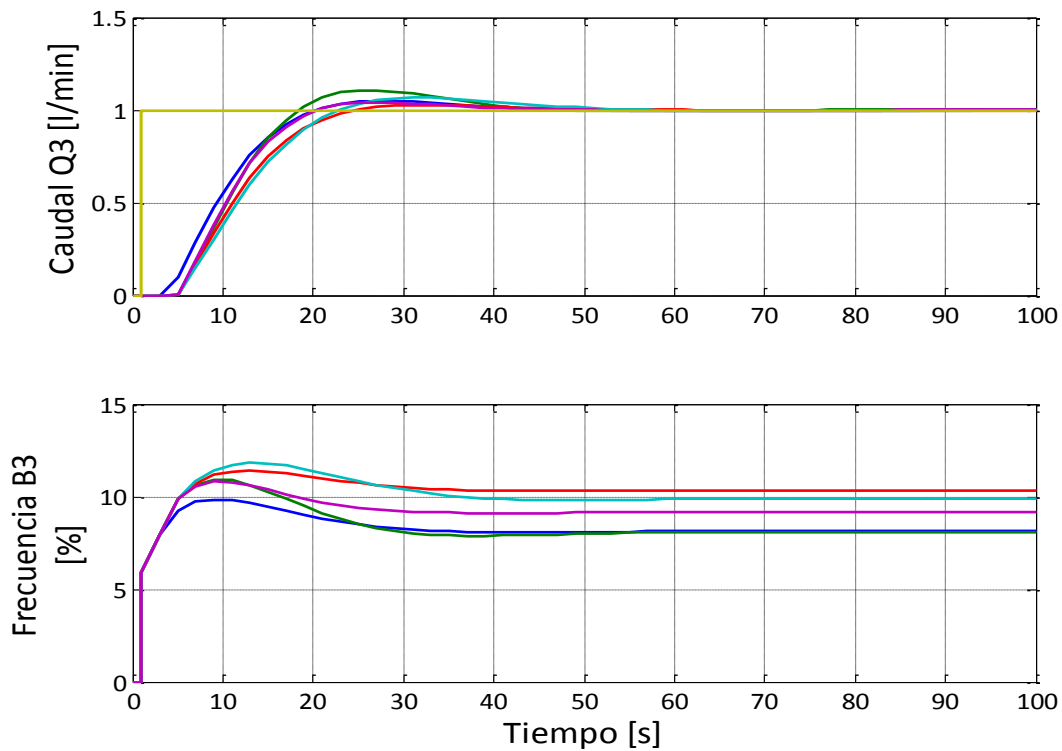


Figura 4.26. Respuestas en lazo cerrado del PID para el control de Q3.

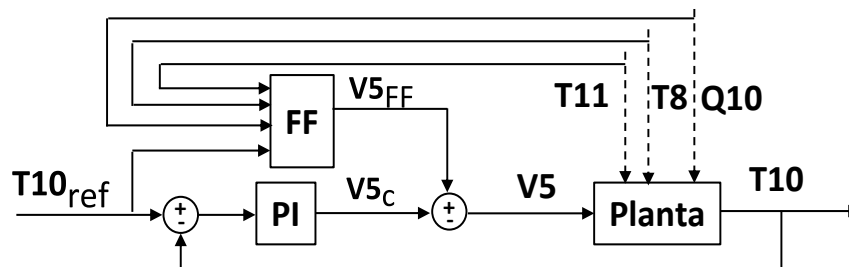


Figura 4.27. Esquema de control del bucle 3- temperatura de entrada al módulo T10.

En la Fig. 4.27 se puede ver la respuesta y la señal de control en lazo cerrado frente a una entrada de tipo escalón. Nuevamente el controlador presenta buenas respuestas frente a todas las dinámicas modeladas, obteniendo la robustez deseada que es el principal objetivo que se persigue en todos los lazos de control debido al amplio rango de puntos de operación que se utilizan. Las señales de control tienen esa forma debido a que el retardo tiene carácter dominante y por tanto se podría haber usado un esquema basado en el Predictor de Smith, opción que se declinó al obtener buenos resultados con este esquema en la planta real.

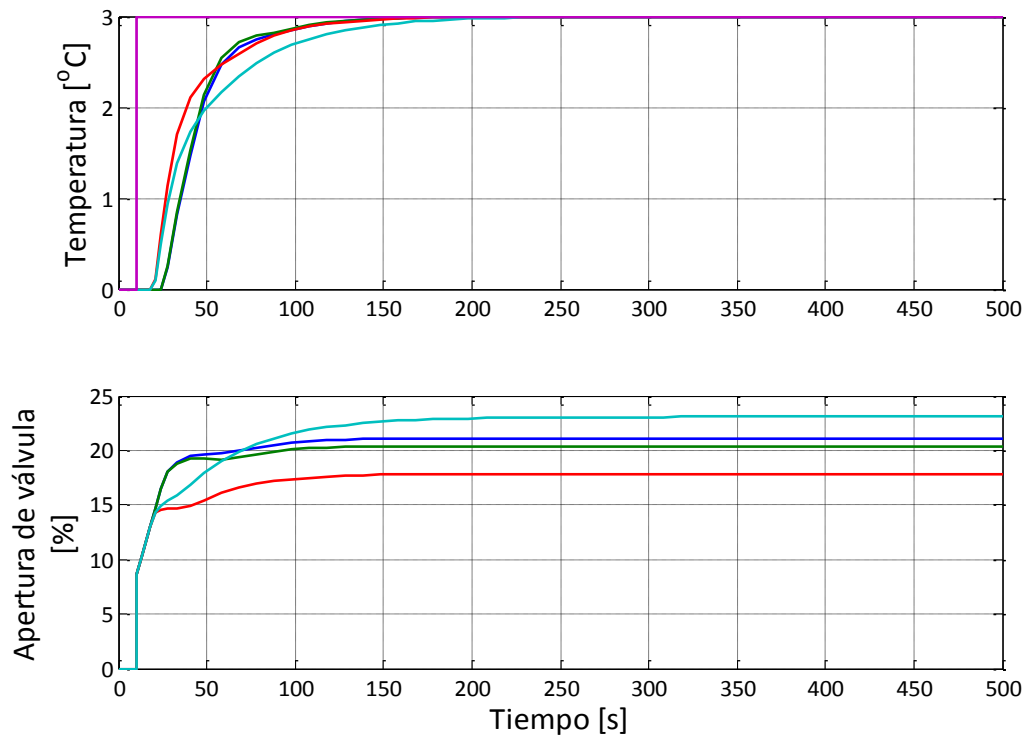


Figura 4.28. Respuestas en lazo cerrado del PI para el control de T10.

4.5 Prueba de los esquemas de control en la planta piloto

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de la aplicación de los esquemas de control propuestos anteriormente en la planta real. Hay que indicar que la disponibilidad de la planta es limitada debido a su uso por parte de otros grupos de investigación. Así se mostrara los ensayos realizados hasta el momento para cada lazo de control, analizando los resultados obtenidos.

En todos los casos se han utilizado los valores de configuración de los lazos indicando en la sección anterior, pero algunos han sufrido ligeros ajustes manuales en vista de los resultados preliminares para obtener una mejor respuesta en la planta real.

Hay que hacer notar que la implementación en la planta de los controladores se ha realizado mediante la librería de LabVIEW *Math script Node* con la cual se han importado directamente *scripts* de MATLAB con los controladores discretizados e incluyendo el mecanismo *anti-windup*. El tiempo de muestreo para la discretización de los controladores ha sido de 1 segundo en todos lo casos, ya que es el tiempo con el que toma muestras el SCADA en la planta.

4.5.1 Resultados para el bucle 1

Para los ensayos reales del esquema de control propuesto para el bucle 1, se utilizó un filtro paso bajo en la referencia con una constante de tiempo de 1 min, con el objetivo principal de disminuir las sobreoscilaciones frente a cambios de tipo escalón en la consigna. Además, el caudal Q1 se satura entre 7.5 y 19 l/min por restricciones operacionales de la bomba 1.

En la Fig. 4.29 se muestran los resultados reales de la aplicación del esquema de control bucle 1. Inicialmente, la temperatura T2 se controla en modo manual hasta alcanzar 65°C. En ese momento, se activa el control en cascada en torno a las 11:00. Cuando T2 alcanza el estado estacionario (11:10) se cambia la consigna a 70°C. El controlador reduce el caudal impulsado por la bomba y T2 alcanza la temperatura deseada con un error en estado estacionario inferior a 0.2°C (del orden de la resolución del sensor). El tiempo de establecimiento asociado es de 6.1 min. A las 11:20, se activa el controlador FF y a las 11:25 se cambia la referencia a 68°C. En este caso, el error en estado estacionario es de 0.4°C con un tiempo de establecimiento de 4.6 min y una sobreoscilación del 20% provocada previsiblemente por el FF (debido a su naturaleza estática y la dinámica no modelada, que también se aprecia en la respuesta de Q1, pues debería encontrarse en torno a 0 y presenta un error negativo). A las 11:42 se incrementó la consigna hasta los 70°C. En este escalón, el error en estado estacionario es de 0.3°C, el tiempo de establecimiento de 4 min y la sobreoscilación del 20%. A las 11:55 se provoca un nuevo cambio de la referencia hasta los 75°C, no apreciándose error en estado estacionario pero sí una sobreoscilación del 25% y un tiempo de establecimiento de 7 min, debido en este caso a una perturbación producida por la temperatura de entrada, debida al circuito de recirculación. A las 12:22 se produce otra perturbación causada por T1, que es adecuadamente compensada por el bloque FF. Se producen otros dos cambios en la consigna a las 12:44 y las 13:07, obteniendo resultados similares a los ya comentados. Al final del ensayo, el paso de nubes provoca cambios en la irradiancia cuyo efecto es parcialmente compensado por el bloque FF en combinación con el control por realimentación. Hay que hacer notar que el valor de la irradiancia medida se filtra con un filtro paso bajo para eliminar el ruido y evitar que éste entre en el bucle de realimentación.

En la Tabla 4.2 se puede ver una comparación de resultados con los obtenidos en simulación. En vista de la comparación, la respuesta del esquema de control en la planta ha sido la esperada ya que los tiempos de establecimiento y la sobreoscilación coinciden con los obtenidos en simulación. En el caso del error en régimen permanente obtenido en la planta real, como se ha mencionado anteriormente es del orden de la resolución del sensor de temperatura PT100, por lo que se puede considerar inexistente.

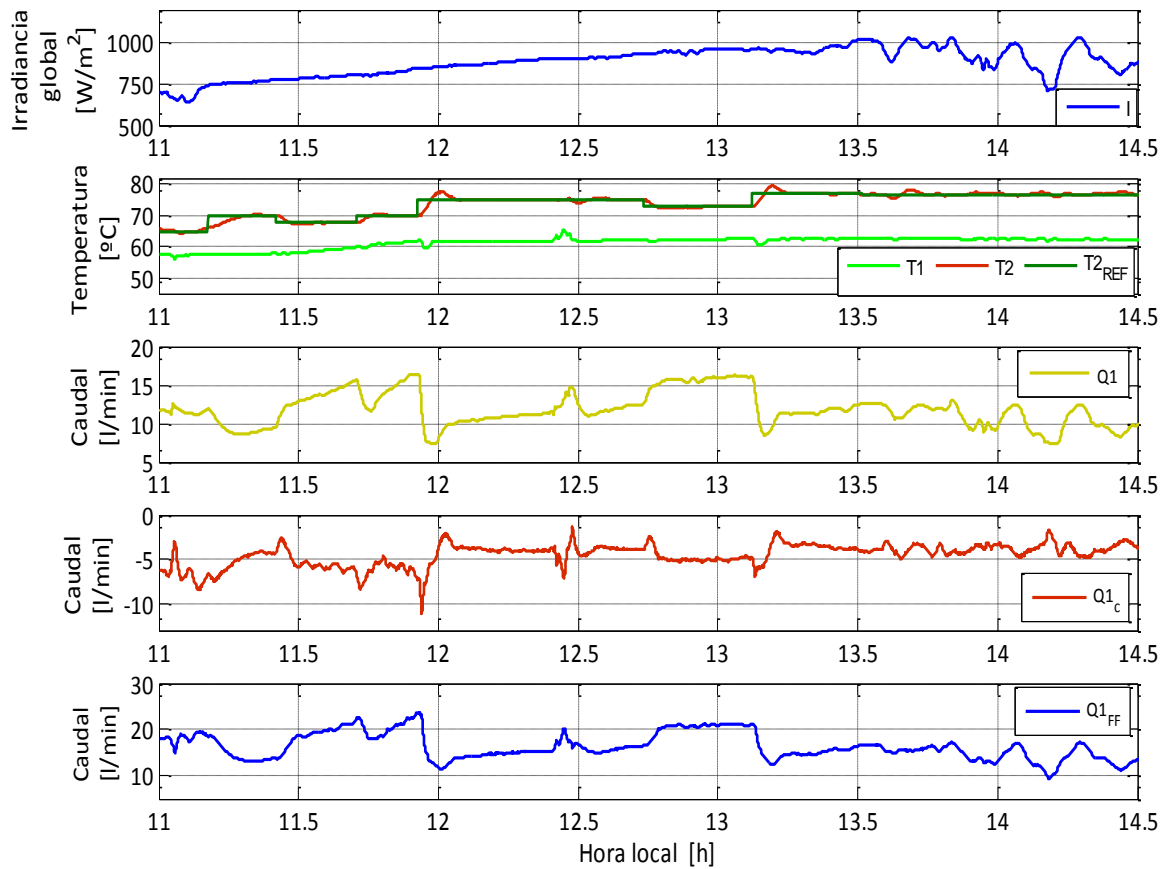


Figura 4.29. Control del campo solar: (1) irradiancia global (I), (2) temperaturas de referencia ($T2_{ref}$), entrada ($T1$) y salida ($T2$), (3) caudal ($Q1$), (4) caudal demandado por el controlador por realimentación ($Q1_c$) y (5) caudal demandado por el controlador FF ($Q1_{FF}$).

	Resultados en la planta real	Resultado en simulación
Tiempo de establecimiento	~5-6 min	~5.83 min
Error en régimen estacionario	~0.2-0.4 °C	-
Sobreoscilación	~20%	~10-15%

Tabla 4.2. Comparativa de resultados con simulación-bucle 1.

	Resultados en la planta real	Resultado en la operación manual
Tiempo de establecimiento	~5-6 min	~11-24 min
Error en régimen estacionario	~0.2-0.4 °C	~2 °C
Sobreoscilación	20%	~20-25%

Tabla 4.3. Comparativa de resultados con la operación manual-bucle 1.

En la actualidad en la operación manual se obtienen sobreoscilaciones entorno al 25%, los tiempos de establecimiento varían entre 11 y 24 min y los errores en estado estacionario están en torno a 2°C (ver Tabla 4.3). Además, al estar operada manualmente es muy complicado mantener la temperatura constante durante los 40 min que necesitan para realizar las operaciones de evaluación de las membranas, debido a las numerosas perturbaciones que sufre el sistema. De forma que hay que estar constantemente pendiente a rechazar de forma manual las diferentes perturbaciones, factor que dificulta la operación e incrementa el tiempo necesario para realizarla.

Por tanto, el esquema de control implementado mejora sustancialmente la operación actual, si bien requiere todavía de bastantes mejoras para intentar reducir los errores de modelado (mejorando por tanto el comportamiento de los controladores diseñados) y sobretodo reducir la sobreoscilación y el tiempo de establecimiento (a través de una mejor sintonización de los controladores y el incremento del valor de la constante de tiempo del filtro en la referencia para desacoplar más el problema de seguimiento de referencia y el rechazo de perturbaciones).

4.5.2 Resultados para el bucle 2

En el caso del bucle 2, solo se han podido hacer dos pruebas de corta duración para probar el bucle de control en la planta real. Para la realización del ensayo, se ha saturado el caudal Q_1 al máximo de forma que se simula las condiciones reales en las que este bucle debe funcionar, ya que este bucle funcionará cuando el caudal esté saturado y el control del campo trabaje en bucle abierto.

En el primer ensayo realizado (Fig. 4.30 y Fig. 4.31) se ha llevado la temperatura manualmente a 76°C y una vez que las variables estaban estables, se ha puesto la apertura de la válvula V1 y el % de funcionamiento de aero a 30% y se ha puesto el bucle de control en marcha. A las 13:35, se ha introducido un escalón de dos grados ($T_{4\text{REF}}=74^{\circ}\text{C}$) de forma que se ha empezado a abrir la válvula V1 desde su punto inicial (30%) mientras que el aero se ha quedado fijo. Como se aprecia en la Fig. 4.31, al abrir la válvula se produce variaciones en Q_1 debidas a las diferentes pérdidas de carga que se establecen en el circuito hidráulico. Por tanto al disminuir el caudal, la temperatura T2 aumenta de forma que se introduce una perturbación que V1 no es capaz de rechazar. En el instante 13:52 se produce la conmutación entre controladores, V1 se satura al máximo (100%) y el aero empieza a regularse, de forma que se consigue llegar a la consigna dada anteriormente con un tiempo de establecimiento total de 20 min para este escalón.

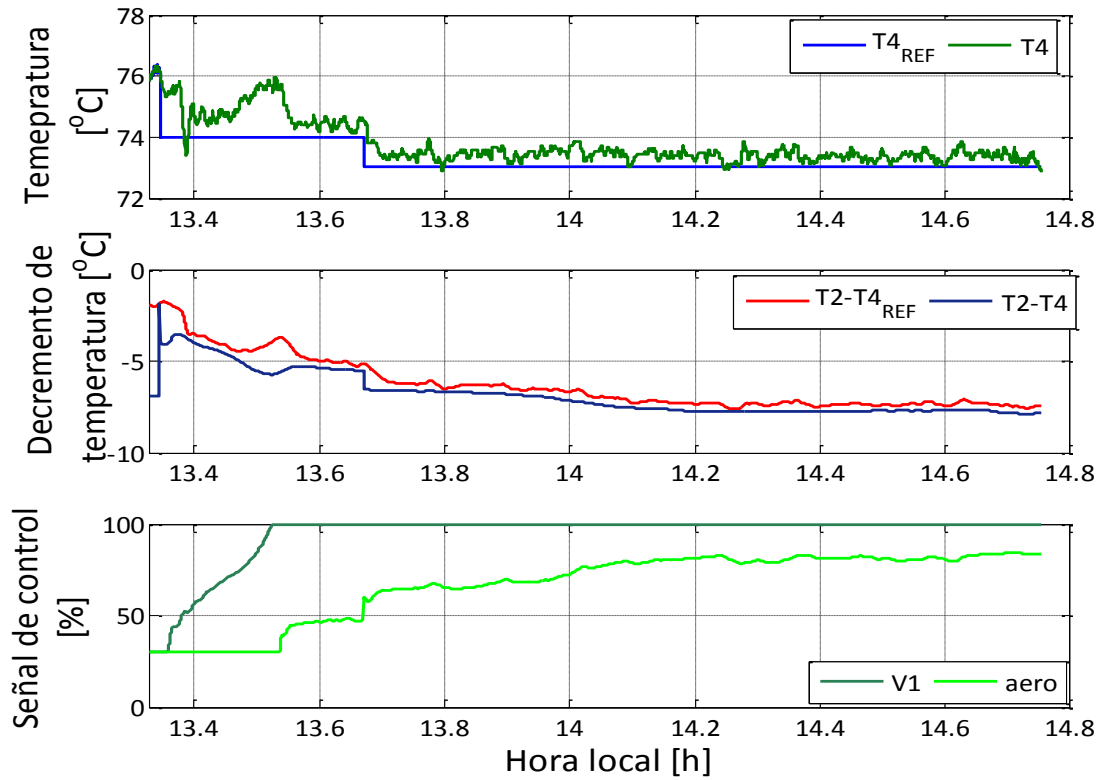


Figura 4.30. Resultados bucle 2-Prueba 1: (1) temperatura de referencia ($T4_{ref}$), salida ($T4$), (2) diferencias de temperaturas ($T2-T4_{REF}$), diferencia de temperatura ($T2-T4$), (3) apertura de la válvula V1, frecuencia de funcionamiento aero.

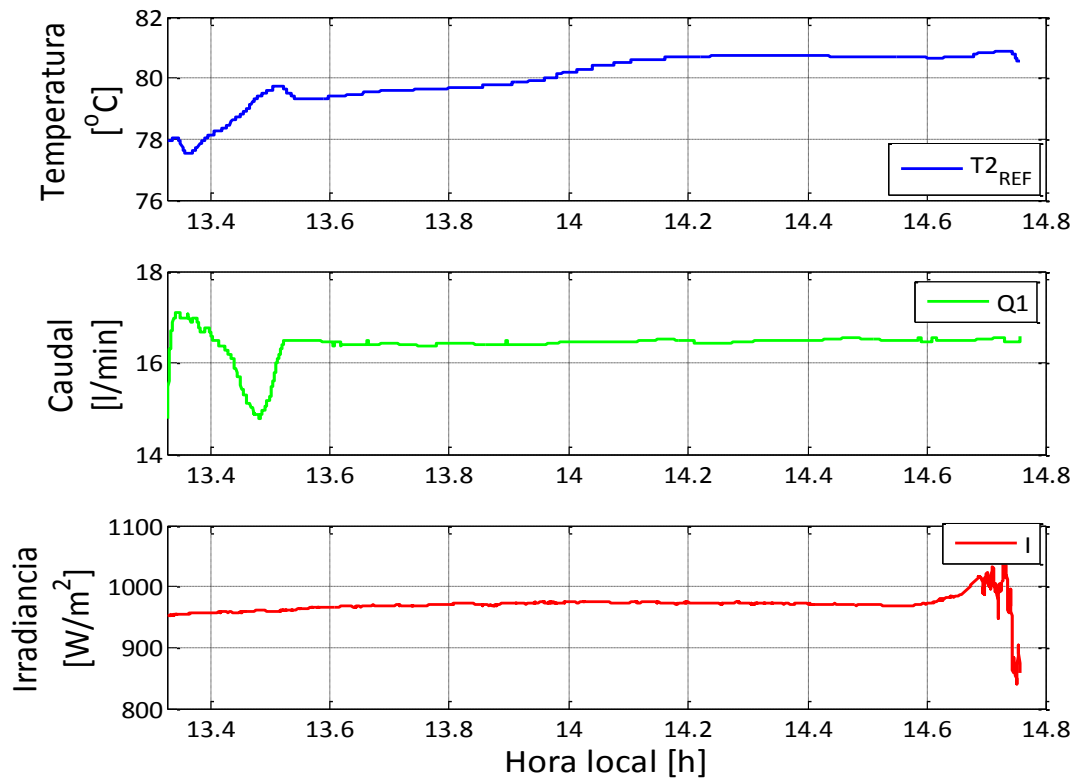


Figura 4.31. Perturbaciones al bucle 2-Prueba 1: (1) temperatura de entrada ($T2$), (2) caudal $Q1$, (3) irradiancia (I).

Hay que hacer notar, que en todo el ensayo se produce un error de *offset* de unos 0.5°C debido a la gestión de consignas que se realiza en el generador de consignas. Este error se produce ya que para generar el decremento de temperatura que se pasa como consigna al controlador se fija T4 pero a esta se le resta T2 que va variando en el tiempo debido a que el control del campo trabaja en lazo abierto. Este hecho produce el error de *offset* y además contribuye a que se sea difícil llegar a un estado estacionario. Así, en el instante 13:67 se introduce un nuevo escalón $T4_{REF}=72^{\circ}\text{C}$ en este caso el tiempo de establecimiento es de unos 4 minutos. En el resto del ensayo la referencia se mantiene constante, y las variaciones que se producen en T4 se deben a que a pesar de estar filtrado los datos, el sensor de temperatura tiene mucho ruido.

En la segunda prueba realizada (Fig. 4.32 y Fig. 4.33) se llevó de nuevo la temperatura a 76.5°C de forma manual y después se puso en marcha el bucle de control. El primer cambio en escalón se realiza a las 14:02 de forma que la referencia pasa a ser 74°C. Así, la válvula comienza a abrirse, produciéndose de nuevo las variaciones en el caudal, hasta llegar al 100%, momento en el que se realiza la conmutación. Una vez que se conmuta, el aere comienza a regularse de forma que se llega a la consigna con un tiempo de establecimiento de unos 20 minutos, teniendo en cuenta que hay un error de *offset* de unos 0.5°C y que hay muchas variaciones en la irradiancia debido a que había nubes pasajeras durante todo el ensayo. En el instante 14:06 se realiza un nuevo cambio en la consigna $T4_{REF}=72^{\circ}\text{C}$. Este cambio hace que el aere se sature ya que la temperatura T2 está muy alta y el máximo decremento de temperatura que se puede conseguir con el caudal al máximo con este bucle de control está en torno a unos 9°C. En el instante 14:70 se vuelve a la consigna anterior $T4_{REF}=74^{\circ}\text{C}$ para que salga de la saturación el aere. Así, en el instante 14:93 se realiza otro cambio en la temperatura $T4_{REF}=75.5^{\circ}\text{C}$, de forma que esta temperatura se mantiene para ver la respuesta que tiene el bucle de control frente a las perturbaciones que se producen debido a la irradiancia. Como se puede observar, las variaciones que hay en la irradiancia producen variaciones en la temperatura de salida del campo T2 y por tanto, variaciones en el decremento de temperatura que se genera en el generador de consignas, como se ha comentado anteriormente. Así, no se llega a un estado estacionario como se puede ver en las gráficas, si no que T4 varía conforme varía T2.

	Resultados en la planta real	Resultado en simulación
Tiempo de establecimiento	~20 minutos	~5 min
Error en régimen estacionario	~0.5°C	-
Sobreoscilación	-	-

Tabla 4.4. Comparativa de resultados con simulación-bucle 2.

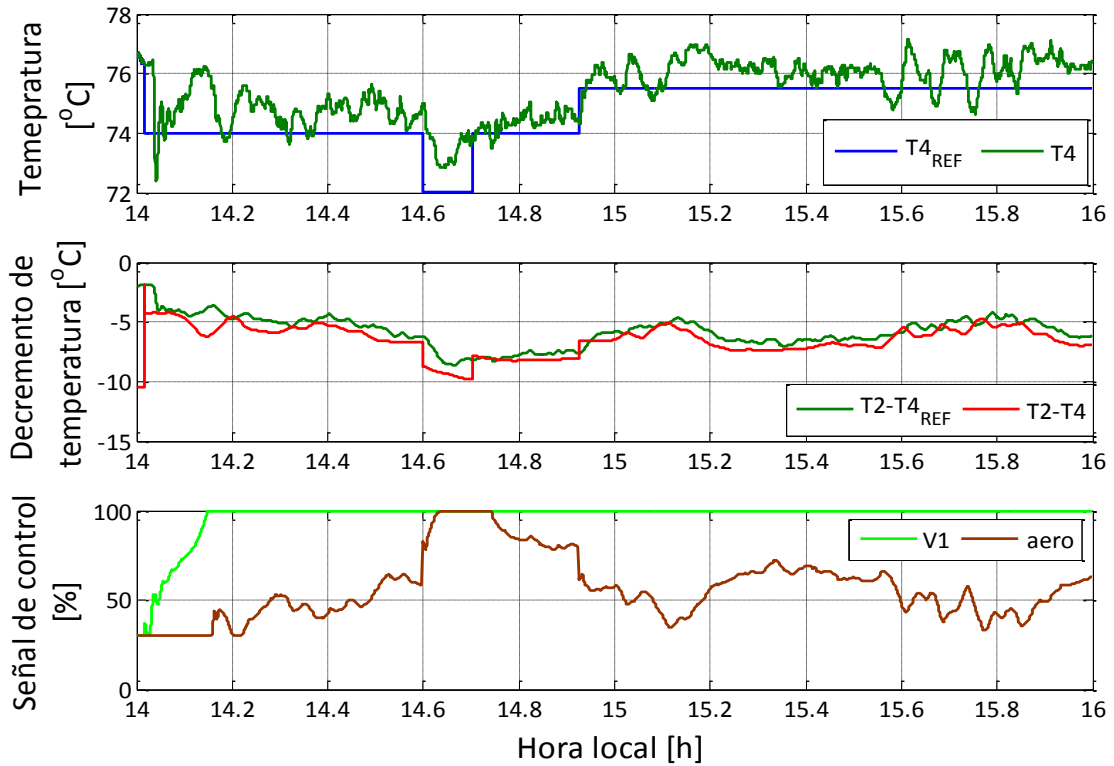


Figura 4.32. Resultados bucle 2-Prueba 2: (1) temperatura de referencia ($T4_{ref}$), salida ($T4$), (2) diferencias de temperaturas ($T2-T4_{REF}$), diferencia de temperatura ($T2-T4$), (3) apertura de la válvula $V1$, frecuencia de funcionamiento $aero$.

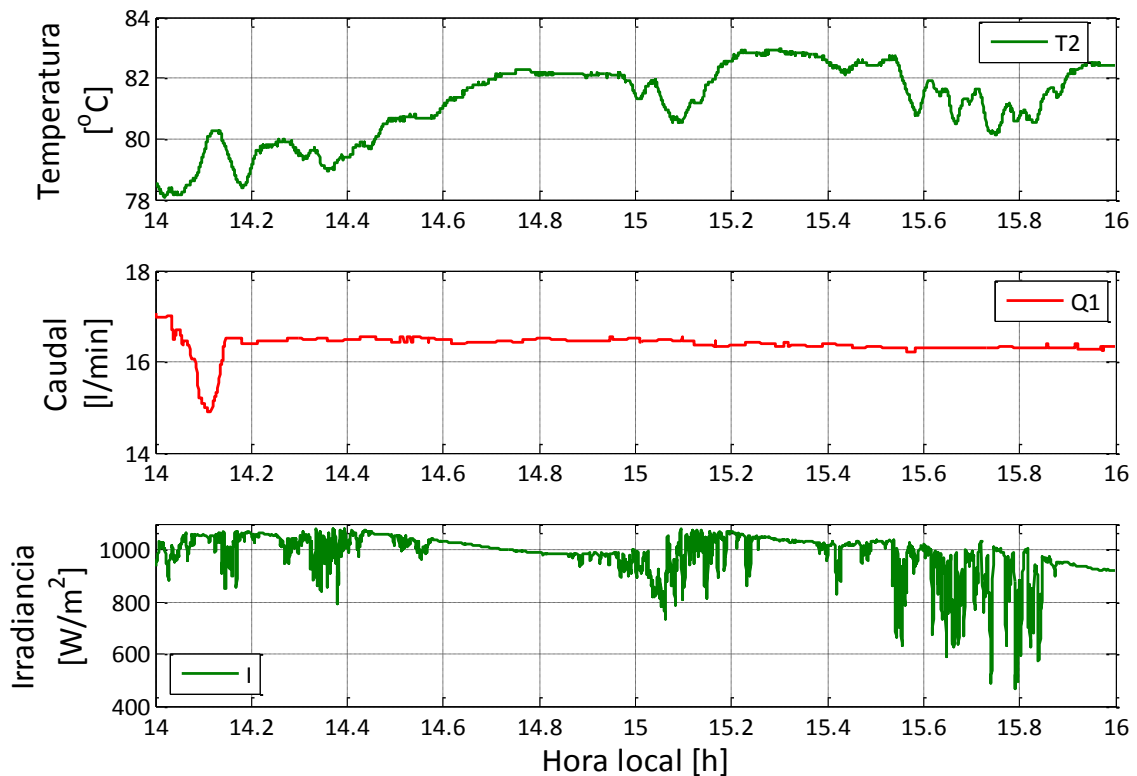


Figura 4.33. Perturbaciones al bucle 2-Prueba 2: (1) temperatura de entrada ($T2$), (2) caudal $Q1$, (3) irradiancia (I).

En la tabla 4.4 se compara los tiempos para escalones en los cuales se haga conmutación entre los controladores. Como se aprecia entre los tiempos de establecimiento de simulación y de la planta real hay una diferencia bastante significativa, esto es debido a que el controlador para V1 es muy lento. Así, a la vista de los resultados se puede indicar que el bucle de control propuesto es apropiado para esta tarea, pero que necesita muchas mejoras tales como: eliminar el error de *offset*, hacer el controlador de V1 más rápido y estudiar la incorporación de controles por adelanto que sean capaces de rechazar las perturbaciones producidas por la irradiancia y a las producidas por Q1 cuando se actúa sobre V1.

4.5.3 Resultados para el bucle 3

En el caso del bucle 3, para la prueba en la planta real, se ha incorporado el control por adelanto descrito por la ecuación (4.9) para rechazar las perturbaciones que entran al lazo. Además, se ha limitado la apertura de la válvula V5 entre el 50 y el 80% como se ha comentado anteriormente. El valor máximo se ha obtenido de ensayos realizados en bucle abierto y se ha observado que con mayores aperturas el flujo másico no se ve prácticamente afectado. La restricción mínima se establece para asegurar que existe suficiente flujo en el circuito hidráulico entre el módulo MD y el sistema de distribución evitando de esa forma paradas de la bomba B3.

La Fig. 4.34 muestra los resultados en los lazos de la bomba B3 y la válvula V5. Inicialmente, ambos bucles se controlan en modo manual ($V5=57\%$, $f_{B3}=66\%$). Poco antes de las 11:30 horas se activan los esquemas de control ($T10_{ref}=63^{\circ}\text{C}$, $Q3_{ref}=10$ l/min). Una vez que se alcanza el estado estacionario, se modifica la consigna de Q3 a 11 l/min, obteniéndose una respuesta en bucle cerrado con un tiempo de establecimiento de 1.1 min y un error en estado estacionario de 0.3 l/min. A continuación, se incrementa la consigna de T10 a 66°C , obteniendo un tiempo de establecimiento de 3 min, sobreoscilación del 20% y error en estado estacionario de 0.4°C . Seguidamente se provoca otro cambio en la consigna de Q3 (hasta 10 l/min) con un resultado similar que en el escalón previo. A las 12:10 cambia la referencia de temperatura a 63°C . En este caso, el tiempo de establecimiento es de 7.8 min debido a que la válvula V5 se satura a su valor mínimo (50%), produciendo una temperatura T10 como la media de T8 y T11, limitando la fuente caliente (T8) el enfriamiento del sistema. Hay que hacer notar que T11 actúa como perturbación en este caso, pues su valor depende de T10. A las 12:25 se vuelve a cambiar la consigna a 67°C , obteniendo un tiempo de establecimiento de 4.2 min, error en estado estacionario de 0.4°C y una sobreoscilación del 25%. Se vuelven a introducir cambios positivos y negativos de la consigna a las 12:50 y 13:05, obteniendo resultados similares. A las 13:30 se reduce el valor mínimo de apertura de la válvula al 20% con el fin de evaluar la posibilidad de ampliar el rango de actuación y poder alcanzar la consigna en el caso de escalones negativos. A continuación se presenta una comparativa de resultados.

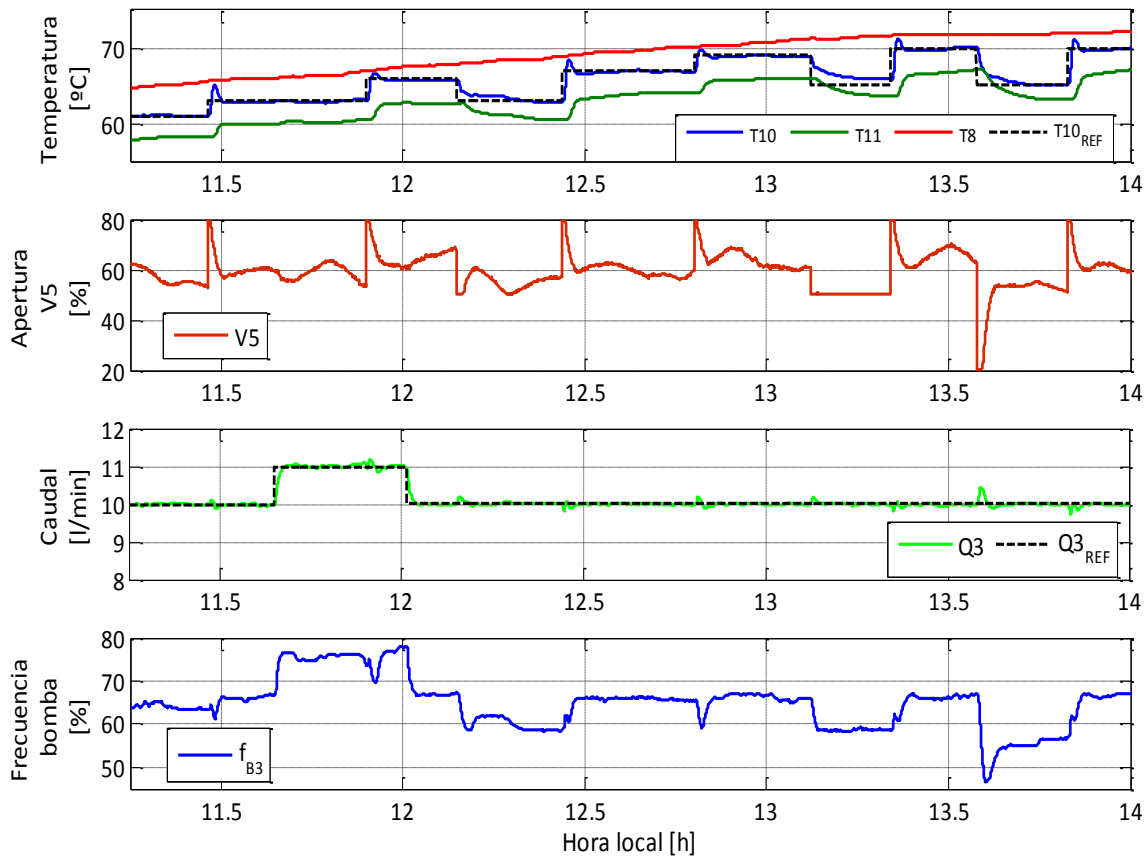


Figura 4.34. Intercambiador de calor del módulo MD: (1) temperaturas de referencia (T_{10ref}), entrada (T_8 , T_{11}) y salida (T_{10}), (2) apertura de la válvula (V_5), (3), caudal de la bomba (Q_3) y referencia (Q_{3ref}), (4) frecuencia de la bomba (f_{B3}).

	Resultados en la planta real (Q3)	Resultado en simulación (Q3)
Tiempo de establecimiento	~1.1-3 min	~1 min
Error en régimen estacionario	~0.3 l/min	-
Sobreoscilación	-	-

Tabla 4.5. Comparativa de resultados con simulación-bucle 3.

En la Tabla 4.4 se puede ver la comparativa de los resultados obtenidos para el bucle de control de Q_3 . Al tratarse de un lazo simple, los resultados obtenidos se ajustan a la perfección con la simulación y el error en régimen permanente se vuelve a atribuir a la resolución del sensor. En el caso del lazo de control de temperatura, se presentan dos dinámicas como se puede apreciar en el ensayo, una para escalones positivos y otra para escalones negativos.

	Resultados en la planta real (T10)	Resultado en simulación (T10)
Tiempo de establecimiento	~4 min	~3.83 min
Error en régimen estacionario	~0.4 °C	-
Sobreoscilación	25%	-

Tabla 4.6. Comparativa de resultados con simulación, escalones positivos-bucle 3.

En las Tablas 4.5 y 4.6 se muestran las comparativas de los resultados obtenidos para el lazo de control de temperatura. La principal diferencia con los resultados en simulación se presenta en la sobreoscilación que se produce por las saturaciones impuestas en V5.

	Resultados en la planta real (T10)	Resultado en simulación (T10)
Tiempo de establecimiento	~7 min	~3.83 min
Error en régimen estacionario	~0.4 °C	-
Sobreoscilación	25%	-

Tabla 4.7. Comparativa de resultados con simulación, escalones negativos-bucle 3.

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



Capítulo 5: Conclusiones y futuros trabajos

5.1 Conclusiones

A lo largo de todo el trabajo ha sido imprescindible el trabajo cooperativo entre el departamento de desalación de aguas de la PSA y el grupo de modelado y control automático de CIESOL-UAL, de forma que se ha contribuido a hacer una explotación más sencilla y viable de la planta, dos factores imprescindibles para facilitar la labor de investigación sobre esta.

La necesidad de este trabajo surgió a raíz de los numerosos problemas que se presentan a la hora de explotar y operar la planta de forma manual. Por tanto, partiendo del análisis de toda la instalación así como de la forma de operar para cada tipo de membranas probadas en la planta se han llegado a soluciones robustas y eficientes.

Una vez estudiada la planta al completo y realizada una revisión bibliográfica sobre el tema de la destilación por membranas MD, se fijó el primer objetivo del trabajo, centrado en realizar un estudio que especifique la forma de operar la planta de la forma más eficiente posible. Así, se definieron modos de operación que aprovechan todos los elementos de la planta y que están pensados para sacar el mayor rendimiento a la energía solar térmica y hacer un uso más eficiente de los elementos basados en energía convencionales (aerotermino y resistencias eléctricas). Esta definición de modos de operación puede contribuir en el futuro a disminuir el gasto energético y por tanto a hacer la operación más viable, económicamente hablando, factor que tiene una gran importancia para que se consiga explotar industrialmente esta tecnología.

Otro de los aspectos importantes de este trabajo, ha sido los pocos artículos y trabajos sobre control automático que existen actualmente para esta tecnología. De esta forma se decidió automatizar la planta al completo, planteando tres lazos de control que dieran la posibilidad de mantener los puntos de operación exigidos para la operación.

Así, se planteó un lazo de control para el campo con el que se han conseguido rechazar las perturbaciones a las que se ve expuesto el campo de forma rápida y con el que se han mejorado los tiempos de establecimiento conseguidos mediante la operación manual. De esta forma se han reducido los tiempos de espera, ya que cuando se operaba manualmente se tardaba aproximadamente entre dos y tres veces más para establecer las referencias de temperatura deseada y además había que estar constantemente rechazando las perturbaciones de forma manual.

El segundo lazo de control empleado también mejora en gran medida la operación manual, sobre todo en términos de eficiencia energética. Esta mejora es debida a que

se operan de forma separada los actuadores minimizando el coste energético. En la operación manual se suele regular la temperatura haciendo un uso muy elevado del aerotermo. Así, el ahorro energético que se consigue con el lazo de control es bastante significativo.

El último lazo de control propuesto permite hacer un seguimiento de consigna a la entrada del módulo. En el caso de la operación manual los dos actuadores automáticos utilizados para controlar en este lazo, se dejan en una posición fija. Así, con el lazo de control planteado se consigue otro grado más de libertad para rechazar perturbaciones y mantener las consignas fijas a la entrada del módulo MD, por lo que se presenta otra ventaja más con respecto a la operación manual.

Por tanto, con este trabajo se ha demostrado la ventaja y la viabilidad del uso del control automático en esta tecnología para conseguir unas condiciones adecuadas de temperatura y caudal a la entrada del módulo MD, reduciendo considerablemente los tiempos de establecimiento y haciendo un uso mucho más eficiente de elementos no basado en energías renovables (aerotermo y resistencias eléctricas).

5.2 Trabajos futuros

Pero todavía queda mucho por avanzar en esta tecnología, la planta con la que se ha trabajado es un sistema que permite más posibilidades de mejora para aumentar la eficiencia y la viabilidad de la operación. De esta forma se plantean los siguientes trabajos futuros:

1. Mejorar el conocimiento sobre la dinámica del sistema y desarrollar modelos del sistema MD (basados en primeros principios y/o en datos experimentales), con el fin de poder realizar el bucle de control 4 planteado en la sección 4.4.
2. Mejorar los modelos y los esquemas de control mostrados en este trabajo con el fin de reducir las sobreoscilaciones que se dan en la planta real y los tiempos de establecimiento.
3. Implementar un lazo de control en el caudal de alimentación de agua salada de la planta, para poder controlar la producción de destilado.
4. Extensión de los lazos de control desarrollados a los 14 modos de operación a través de un esquema de control predictivo multivariables basado en descripciones MLD (*Mixed Logical Dynamics*).
5. Implementar una estrategia de control jerárquica que permita optimizar las consignas a los lazos de control diseñados teniendo en consideración diferentes objetivos: maximización de la producción diaria de destilado y su calidad, maximizar la eficiencia energética, minimizar costes de operación, ...)

5.3 Publicaciones

Como complementos a este trabajo y en vista a los pocos trabajos relacionadas con el control para esta tecnología en la literatura. Se han realizado tres publicaciones en las que se describen completamente los resultados obtenidos. Las referencias se presentan a continuación:

1. J.D Gil, A. Ruiz-Aguirre, L. Roca, G. Zaragoza, M. Berenguel. "Solar membrane distillation: a control perspective". *23rd Mediterranean Conference in Control and Automation (MED 2015)*, pp. 836-842, Torremolinos, España, 2015.
2. J.D Gil, A. Ruiz-Aguirre, L. Roca, G. Zaragoza, M. Berenguel, J.L. Guzamán. "Control de plantas de destilación por membranas con apoyo de energía solar-Parte 1: Esquemas". XXXVI Jornadas de Automática, Bilbao, España, 2015.
3. J.D Gil, A. Ruiz-Aguirre, L. Roca, G. Zaragoza, M. Berenguel, J.L. Guzamán. "Control de plantas de destilación por membranas con apoyo de energía solar-Parte 2: Resultados". XXXVI Jornadas de Automática, Bilbao, España, 2015.

Así, en el primer trabajo citado se presentan las arquitecturas de control preliminares pensadas para implantar en la planta y una descripción completa de los modos de operación planteados. En el segundo se incluye una descripción sobre la instalación y los esquemas de control implementados para conseguir unas condiciones adecuadas de flujo másico y temperatura a la entrada del sistema de destilación. El tercer trabajo citado es una continuación del segundo y en él se muestran los resultados de simulación y experimentales de la operación del sistema automático.



Capítulo 6: Bibliografía

En este capítulo se presenta toda la bibliografía consultada ordenada alfabéticamente por el apellido del autor principal.

- [1] S. B. Abdallah, N. Frikha, S. Gabsi. "Simulation of solar vacuum membrane distillation unit". *Desalination*, vol. 324, pp. 87-92, 2013.
- [2] A. Alkudhiri, N. Darwish and N. Hilal. Membrane distillation: "A comprehensive review". *Desalination*, vol. 287, pp. 2–18, 2012.
- [3] P. Antsaklis y X.D. Koutsoukos. "Hybrid systems: Review and recent progress" *Software-Enabled Control: Information Technology for Dynamical Systems*. IEEE Press, 2003.
- [4] M. Araus Gozalo. "Programa AGUA. Desalinización como instrumento de autosuficiencia hídrica territorial", Informe técnico, ACUAMED S.A. 2004.
- [5] K. J. Aström, T. Hägglund: "Control PID avanzado". Ed. Pearson, 2009.
- [6] V. A. Bui, L. T. T. Vu, M. H. Nguyen. "Simulation and optimization of direct contact membrane distillation for energy efficiency". *Desalination*, vol. 259, pp. 29-37, 2010.
- [7] E. F. Camacho, M. Berenguel, F. R. Rubio, D. Martínez. "Control of Solar Energy Systems", *Springer*, London, 2012.
- [8] L. M. Camacho, L. Dumée, J. Zhang, J. Li, M. Duke, J. Gomez, S. Gray. "Advances in membrane distillation for water desalination and purification applications". *Water*, vol. 5, pp. 94-196, 2013.
- [9] H. Chang, S-G. Lyu, C-M. Tsai, Y-H. Chen, T-W. Cheng, Y-H. Chou. "Experimental and simulation study of a solar thermal driven membrane distillation desalination process". *Desalination*, vol. 286, pp. 400-411, 2012.
- [10] H. Chang, G-B. Wang, Y-H. Chen, C-C. Li, C-L. Chang. "Modeling and optimization of a solar driven membrane distillation desalination system". *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 2714-2722, 2010.
- [11] M. S. El-Bourawi, Z. Ding, R. Ma, M. Khayet. "A framework for better understanding membrane distillation separation process". *Journal of Membrane Science*, vol. 85, pp. 4-29, 2006.
- [12] F. Eleiwi, T. M. Laleg-Kirati. "Dynamic modeling and optimization in membrane distillation system". *19th IFAC World Congress*, Cape Town, South Africa, 2014.
- [13] J. D. Gil, A. Ruiz-Aguirre, L. Roca, G. Zaragoza, M. Berenguel. "Solar membrane distillation: a control perspective". *23rd Mediterranean Conference in Control and Automation (MED 2015)*, pp. 836-842, Torremolinos, España, 2015.
- [14] J.D Gil, A. Ruiz-Aguirre, L. Roca, G. Zaragoza, M. Berenguel, J.L. Guzmán. "Control de plantas de destilación por membranas con apoyo de energía solar-Parte 1: Esquemas". *XXXVI Jornadas de Automática*, Bilbao, España, 2015.

- [15] J.D Gil, A. Ruiz-Aguirre, L. Roca, G. Zaragoza, M. Berenguel, J.L. Guzmán. "Control de plantas de destilación por membranas con apoyo de energía solar-Parte 2: Resultados". *XXXVI Jornadas de Automática*, Bilbao, España, 2015.
- [16] E. Guillén-Burrieza, G. Zaragoza, S. Miralles-Cuevas, J. Blanco. "Experimental evaluation of two pilot-scale membrane distillation modules used for solar desalination". *Journal of Membrane Science*, vol. 409-410, pp. 264–275, 2012.
- [17] E. Guillén-Burrieza, J. Blanco, G. Zaragoza, D.C. Alarcón, P. Palenzuela, M. Ibarra, W. Gernjak. "Experimental analysis of an air gap membrane distillation solar desalination pilot system". *Journal of Membrane Science*, vol. 379, pp. 386–396, 2011.
- [18] J.L. Gúzman, R. Costa-Catelló, M. Berenguel, S. Dormido. "Control automático con herramientas interactivas". Ed. Pearson, 2012
- [19] T. Hägglund. "A unified discussion on signal in PID Control". *Control Engineering Practice*, vol. 21, pp. 994-1006, 2013.
- [20] 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.
- [21] J. S. Ling, H. Chang, G. B. Wang. "Modelling and control of the solar powered membrane distillation system". In *AIChE annual meeting*, Minneapolis, MN, USA, 2011.
- [22] L. Ljung: "System Identification Toolbox 7". Guía de usuario, The MathWorks.
- [23] V. Martínez Álvarez, B. Martín Górriz. "Antecedentes y problemáticas de la aplicación de agua marina desalinizada al riego agrícola". Informe técnico, Universidad politécnica de Cartagena, 2014.
- [24] B. Montaña. "Análisis económico de la desalación", Tesis doctoral, universidad de Alicante, 2001.
- [25] S. Nafey, M. A. Sharaf, L. García-Rodríguez. "A new visual library for design and simulation of solar desalination systems". *Desalination*, vol. 259, pp. 197-207, 2010.
- [26] J. E Normey-Rico, C. Bordons, E. F Camacho. "Improving the robustness off dead-time compensation PI controllers". *Control Engineering Practice*, vol. 5, pp. 801-810, 1997.
- [27] K. Ogata: "Ingeniería de control moderna". Ed. Pearson, 5ª Edición, 2010.
- [28] M. Pasamontes, J. D. Álvarez, J. L. Guzmán, M. Berenguel, E. F. Camacho. "Hybrid modeling of a solar-thermal heating facility". *Solar Energy*, vol. 97, pp. 577-590, 2013.
- [29] R. Porrizzo, A. Cipollina, M. Galluzzo, G. Micale. "A neural network-based optimizing control system for a seawater-desalination solar-powered membrane distillation unit". *Computers & Chemical Engineering*, vol. 54, pp. 79-96, 2013.
- [30] L. Roca, M. Berenguel, L. J. Yebra, D. C. Alarcón-Padilla. "Solar field control for desalination plants". *Solar Energy*, vol. 82, pp. 772-786, 2008.

- [31] L. Roca, J. L. Guzmán, J. E. Normey-Rico, M. Berenguel, L. J. Yebra. "Robust constrained predictive feedback linearization controller of a collector field of a solar desalination plant". *Control Engineering Practice*, vol. 17, pp. 1076-1088, 2009.
- [32] R. N. Silva, L. M. Rato, J. M Lemos, F. Coito. "Cascade control of a distributed collector solar field". *Journal of Process Control*, vol.7, pp 111-117, 1997.
- [33] S. Skogestad. "Symple analytic rules for model reduction and PID controller tuning". *Journal of process control*, vol.13, pp. 92-102, 2003.
- [34] S. Skogestad, C. Grimholt. "The SimC method for smooth PID controller tuning". In R. Vilanova, A. Visioli (eds.), *PID control in the Third Millenium*, Advances in Industrial Control, Springer-Verlag London Limited, 2012
- [35] A. Vijay, K. V. Ling, A. G. Fane. "Applications of convex optimization in plant-wide control of membrane distillation bio-reactor water recycling plant". *11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*. Singapore, 2010.
- [36] G. Zaragoza, A. Ruiz-Aguirre, 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.
- [37] K. Zotalis, E. G. Dialynas, N. Mamassis y A. N. Angelakis. "Desalination technologies: Hellenic Experience". *Water*, vol. 6(5), pp. 1134-1150, 2014.



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 la energía solar como fuente primaria de energía. Una de las pocas plantas piloto basada en esta tecnología está ubicada en la Plataforma Solar de Almería (PSA).

Los objetivos principales de este trabajo consisten en establecer un funcionamiento automático y óptimo para la planta piloto de la PSA. Así, en este trabajo se incluye una descripción completa de la planta y un análisis sobre la forma de operación manual de esta instalación. Se proponen modos de operación pensados para automatizar la planta de la forma más eficiente posible, se realiza una caracterización dinámica de la instalación y se desarrollan los esquemas de control propuestos para conseguir unas condiciones adecuadas de flujo másico y temperatura a la entrada del sistema de destilación, mostrando los resultados obtenidos en simulación y los obtenidos experimentalmente sobre la planta.