

## CONTROL DE PLANTAS SOLARES CON GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE CONSIGNAS

Cristina M. Cirre<sup>(1)</sup>, Loreto Valenzuela<sup>(2)</sup>, Manuel Berenguel<sup>(3)</sup>, Eduardo F. Camacho<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup>Convenio Universidad de Almería-Plataforma Solar de Almería,  
Ctra. Senés s/n, 04200 Tabernas, Almería. Email: [cristina.martinez@psa.es](mailto:cristina.martinez@psa.es)

<sup>(2)</sup>CIEMAT, Plataforma Solar de Almería,

Ctra. Senés s/n, 04200 Tabernas, Almería. Email: [loreto.valenzuela@psa.es](mailto:loreto.valenzuela@psa.es)

<sup>(3)</sup>Universidad de Almería, Dpto. Lenguajes y Computación,

Ctra. Sacramento s/n, 04120, Almería. Email: [beren@ual.es](mailto:beren@ual.es)

<sup>(4)</sup>Univ. Sevilla, Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática,  
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, Sevilla. Email: [eduardo@esi.us.es](mailto:eduardo@esi.us.es)

Resumen: En este trabajo se muestran los resultados de operación de un campo de colectores solares del tipo cilindro parabólico de forma automática con una estructura de control por adelanto en paralelo con un controlador tipo I-PD que incorpora como principal novedad un sistema de generación automática de consignas. El objetivo de control para este sistema es mantener la temperatura del fluido a la salida del campo a un valor establecido, compensando las perturbaciones a las que está sometida la planta con dinámica fuertemente no lineal. *Copyright © 2004 CEA-IFAC*

Palabras Clave: Generación automática de consignas, Control por adelanto, Control PID, Energía Solar.

### 1. INTRODUCCIÓN

El campo de colectores solares cilindro-parabólicos ACUREX es una de las instalaciones de la Plataforma Solar de Almería (PSA) situada en el desierto de Tabernas (Almería, sudeste de España). La Fig. 1 muestra una vista aérea y de detalle del campo de colectores solares ACUREX y la Fig. 2 un diagrama esquemático de dicha planta mostrando las principales señales. El campo solar consta de 480 módulos de colectores, organizados en 10 filas paralelas (Fig. inferior y lazos 1 a 10 en la Fig. 2). Cada colector está constituido por una superficie parabólica reflectante que concentra la radiación solar directa en un tubo situado en la línea focal de la parábola (Duffie and Beckman, 1991). La concentración de rayos solares en el tubo permite calentar el fluido que circula por su interior. La orientación de los colectores en el campo solar es este-oeste. Los colectores tienen un sistema de seguimiento solar de un solo eje (elevación) para garantizar la concentración de la radiación solar en los tubos absorbedores. El fluido caloportador empleado es aceite tipo Santhoterm 55, cuyo límite

de temperatura sin degradarse está en 300°C. El aceite se encuentra en un tanque de almacenamiento térmico de donde se extrae de la parte baja para ser calentado. Por medio de una bomba de impulsión (P-03 en la Fig. 2) se envía al campo de colectores y el retorno del aceite caliente puede hacerse a la parte alta del tanque (aceite de proceso) o a la parte baja (recirculación hasta alcanzar una temperatura de trabajo) por medio de una válvula de tres vías que se encuentra a la salida del campo solar.

El tanque tiene una capacidad efectiva de 115 m<sup>3</sup> (Zarza, 1995). Las propiedades del aceite permiten que el tanque se convierta en un almacén de energía estratificado en función de la densidad del mismo. El aceite más frío se encuentra en la parte baja del tanque y el aceite caliente en la parte superior. El aceite caliente se utiliza en procesos de generación de electricidad o en desalación solar, como se comenta en más detalle en la sección 2. En ambos casos el aceite se extrae de la parte alta del tanque, siendo por tanto conveniente evitar fluctuaciones en la temperatura de salida del campo solar.



Fig. 1 Vista aérea y detalle del campo ACUREX

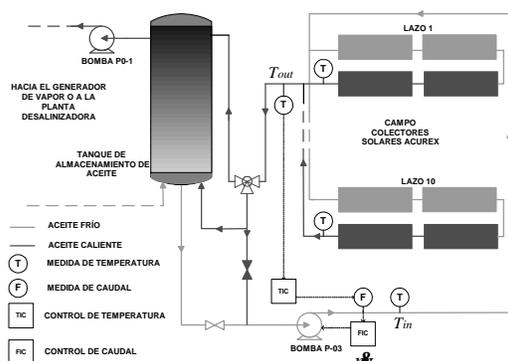


Fig. 2 Diagrama de la planta ACUREX

En la Tabla 1 se describen algunas características relevantes del campo solar.

Tabla 1. Características geométricas del campo solar ACUREX

Superficie reflectante	2672m <sup>2</sup>
Diámetro exterior tubo absorbedor	0.031m
Espesor tubo absorbedor	0.002m
Longitud fila de colectores	172m
Distancia separación entre filas	5m
Potencia térmica nominal	6.5MW <sub>th</sub>

El artículo se encuentra organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se trata el problema de control de este tipo de plantas. En la sección 3 se describe la estructura de control desarrollada, prestando especial atención al sistema de generación automática de consignas. En la sección 4 se muestran resultados experimentales obtenidos en la planta solar con la estructura de control implementada y la sección 5 finaliza con las conclusiones a las que se ha llegado en este trabajo.

## 2. EL PROBLEMA DE CONTROL

El objetivo de control de un campo de colectores solares es mantener la temperatura de salida del campo a un valor preestablecido que es determinado

de forma manual durante la operación en planta. Dicho valor preestablecido se denomina consigna o temperatura de referencia ( $T_{ref}$ ). Esta consigna debe ser lo más alta posible para tener el aceite del tanque a una temperatura suficiente para alimentar el generador de vapor de una planta desalinizadora o de una turbina para producir energía eléctrica (logrando además una solución de compromiso en la optimización de la eficiencia del campo solar frente a las pérdidas térmicas). Para la planta desalinizadora se necesita tener el aceite en el tanque a temperaturas superiores de 160°C y para producir energía eléctrica a una temperatura en torno a 285°C. Además, para evitar tensiones del material de los tubos absorbedores solar se recomienda establecer una consigna tal que la diferencia entre la temperatura del aceite a la salida y la temperatura de entrada al campo solar no sea mayor de 80°C. Esto añade más complejidad a la operación del sistema ya que es necesario cambiar la consigna dependiendo del punto de operación de la planta (determinado fundamentalmente por el nivel de radiación solar, temperatura de entrada del aceite, caudal de aceite, temperatura ambiente y reflectividad de los espejos, que puede también variar por deposición de polvo) y de las restricciones impuestas por seguridad. Por ejemplo, la aparición esporádica de nubes dificulta mucho el control en ese sentido, ya que las variaciones en el nivel de radiación solar afectan rápidamente a la temperatura de salida del campo. El problema del establecimiento de consignas de temperatura adecuadas a las condiciones de la planta mencionadas en los párrafos previos se ha resuelto en este trabajo diseñando un generador automático de consignas que tiene en cuenta las restricciones por seguridad de la planta y su estado de funcionamiento actual, buscando siempre como óptima la temperatura más alta, dado que las pérdidas térmicas no son muy significativas para el rango de temperaturas de operación considerado. La temperatura de salida es manipulada variando el caudal de aceite enviado por la bomba de circulación. Esta bomba está diseñada para proporcionar un caudal volumétrico de aceite entre 2 y 12 l/s., determinando así el rango de operación de la planta. Las no linealidades que caracterizan al sistema aumentan la complejidad de la operación. Dependiendo del rango de trabajo y de las perturbaciones de la planta – en la irradiancia ( $I_{rr}$ ), temperatura de entrada ( $T_{in}$ ), temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) y reflectividad de los espejos ( $s$ ) – la ganancia, constantes de tiempo y retardo del sistema varían. La fase en la que es más difícil operar el sistema (desde el punto de vista del control) es la fase de arranque, como se ha constatado durante los últimos 10 años, en los que se han ensayado distintas estrategias de control en la planta (e.g. Juuso and Valenzuela, 2003, Camacho *et al.*, 1997; The Improving Human Potential programme, 2003; Training and Mobility Researches programme at PSA, 1998), habiendo supuesto dicha fase un problema para muchos de ellos, procediéndose a manipular el caudal de forma manual hasta que el sistema se encontrara en unas condiciones seguras para ser operada de forma automática por el algoritmo de control. Juuso y

Valenzuela (2003) han sido los únicos que han utilizado temperaturas de referencia adaptadas al punto de operación, habiendo obtenido buenos resultados en la fase de arranque. Sin embargo en la mayoría de los casos el objetivo de los ensayos realizados para probar estructuras de control no ha sido optimizar la definición de consignas para obtener en cada instante la máxima temperatura de salida del sistema, sino evaluar la respuesta de los controladores ante escalones en la temperatura de referencia, provocados de forma manual. La temperatura de referencia era establecida heurísticamente teniendo en cuenta las condiciones actuales de la planta. Desde un punto de vista de explotación de la planta, resulta de mayor interés la implantación de un esquema de control como el contemplado en este trabajo.

### 3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE CONTROL

La estructura de control diseñada se puede ver en la Fig. 3. Los bloques de control diseñados son un generador de consignas, un controlador por adelanto y un I-PD en paralelo al control por adelanto. El generador de consigna proporciona una referencia adecuada de temperatura de salida,  $T_{ref}$ , teniendo en cuenta el estado actual de la planta (dado por  $Irr$ ,  $T_{in}$ ,  $T_{amb}$ ,  $s$  y el máximo salto térmico permitido  $DT = (T_{out} - T_{in})$ , siendo  $T_{out}$  la temperatura de salida) al controlador por adelanto y a la estructura I-PD, cuyas salidas ( $C_{ff}$  y  $C_{ipd}$ ) se combinan dando un caudal adecuado para obtener a la salida de los lazos una temperatura  $T_{out}$  igual a  $T_{ref}$ .

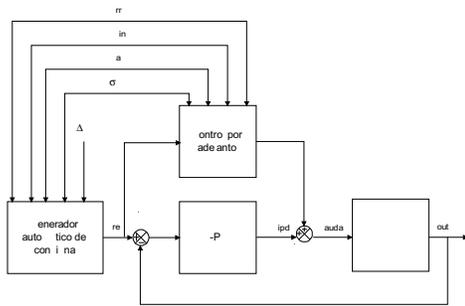


Fig. 3 Esquema de control de la planta ACUREX

La función de control por adelanto establece un caudal nominal que debería ser suficiente para obtener la temperatura deseada, pero debido a la inexactitud del modelo utilizado y perturbaciones no medibles es necesario corregir su salida para eliminar el error en régimen permanente que aparecería si solo funcionase el control por adelanto. Cada bloque de control es analizado en las subsecciones siguientes.

#### 3.1 Generador automático de consignas

El objetivo de introducir un generador automático de consignas en el lazo de control es facilitar a la estructura de control la regulación introduciendo una  $T_{ref}$  adecuada para las condiciones en las que se encuentra la planta que además asegure la mayor temperatura de salida posible dentro de los límites de

seguridad de la planta. Además, se pretende asegurar que el caudal dictado por el controlador no sea inferior a 3 l/s, pues la dinámica de la planta es más complicada cuando se trabaja a muy bajo caudal (en torno a 2 l/s), dado que el tiempo de residencia del fluido en el campo solar y la constante de tiempo dominante aumentan, provocando mayores oscilaciones cuando se excitan los modos resonantes característicos de este sistema (Meaburn and Hughes, 1994; Berenguel and Camacho, 1996). Este elemento proporciona además robustez en el lazo de control ante perturbaciones de radiación y temperatura de entrada, suministrando como entrada al controlador una  $T_{ref}$  óptima y segura para la operación. Como se comentará posteriormente, debido a los cambios bruscos en las perturbaciones y al uso de modelos estáticos en la generación de referencias, será preciso filtrar la consigna con un filtro paso bajo. Otro beneficio del uso de un generador automático de consignas es la ayuda que proporciona al controlador, cualquiera que sea el algoritmo de control utilizado, durante la fase de arranque, ya que el generador tiene en cuenta las variaciones de  $T_{in}$  en cada instante debidas a la existencia de aceite frío residente en las tuberías y que es recirculado a la entrada del campo solar sin pasar por el tanque de almacenamiento. Tomando como base una ecuación de balance de energía (1) y en los estudios realizados por Camacho *et al.* (1997) y Carmona (1985) se ha obtenido una función que calcula una temperatura de referencia adecuada a las condiciones actuales de la planta y que tiene en cuenta el  $DT$ . En (1)  $Q_{in}$  es la energía que entra en el sistema en W, y que viene descrita por la expresión (2) y  $Q_{loss}$  es la energía que se pierde, que se puede expresar como una función de la diferencia entre la temperatura de salida y la ambiente (3). El término derecho de la ecuación (1) corresponde por tanto a la energía que gana el sistema, siendo  $\dot{m}$  el caudal másico de aceite (Kg/s) y  $Dh$  la diferencia de entalpía entre la salida y la entrada del campo solar (J/Kg/s). La entalpía específica del aceite se puede calcular usando la expresión (4) a partir del calor específico del aceite  $c_p$ , que es función de la temperatura  $T$  en grados Celsius (5).

$$Q_{in} - Q_{loss} = \dot{m} \cdot \Delta h \quad (1)$$

$$Q_{in} = h \cdot s \cdot A_{cor} \cdot Irr_{cor} \quad (2)$$

$$Q_{loss} = H_l \cdot (T_{out} - T_{amb}) \quad (3)$$

$$h = c_p \cdot T \quad (4)$$

$$c_p = 1820 + 3.478 \cdot T \quad (J / Kg \text{ } ^\circ C) \quad (5)$$

La energía que entra en el sistema  $Q_{in}$  depende de la eficiencia óptica pico de los colectores ACUREX ( $h$ ), de la reflectividad de los espejos ( $s$ ), de la superficie efectiva reflectante ( $A_{cor}$ ) y de la irradiancia efectiva en la superficie del colector ( $Irr_{cor}$ ) (Ajona, 1998). Los valores de  $A_{cor}$  e  $Irr_{cor}$  son obtenidos en función del ángulo de incidencia entre los rayos solares y la normal del colector. Dicho ángulo depende de la hora solar y de la fecha. El ángulo de incidencia es actualizado durante la operación de la planta para establecer  $Irr_{cor}$  y  $A_{cor}$  a partir de la radiación directa y de la superficie total

reflectante respectivamente. La energía perdida por el sistema  $Q_{loss}$  se calcula según la ecuación (3) y depende de una función global de pérdidas  $H_l$  que ha sido estimada a partir de datos experimentales (Carmona, 1995) y cuyo valor es calculado en función de las temperaturas  $T_{out}$ ,  $T_{in}$  y  $T_{amb}$  (6) y de los parámetros  $Coef1$  y  $Coef2$  cuyos valores son 0.0055 y 0.006133 respectivamente.

$$H_l = Coef1 \left( \frac{T_{out} + T_{in}}{2} - T_{amb} \right) - Coef2 \quad (W/^{\circ}C) \quad (6)$$

$$r = 903.16 - 0.672 \cdot T_{in} \quad (kg/m^3) \quad (7)$$

Teniendo en cuenta la función (7) que permite calcular la densidad del aceite en función de su temperatura y así obtener el caudal másico  $\dot{m}$  a partir del caudal volumétrico, combinando las ecuaciones (1), (2) y (3) se obtiene una expresión que permite calcular la consigna de temperatura  $T_{ref}$  si esta variable sustituye a  $T_{out}$  (sustitución de la temperatura de salida por la deseada) a partir de un caudal másico determinado.

$$A = 3.478 \cdot 10^{-3} + \frac{Coef1}{2 \cdot \dot{m}} \quad (8)$$

$$B = 1.820 + \frac{Coef1 \cdot (T_{in} - T_{amb}) - Coef1 \cdot T_{amb} - Coef2}{\dot{m}} \quad (9)$$

$$C = - \left( \frac{h \cdot s \cdot A_{cor} \cdot Irr_{cor} + \left( \frac{coef1 \cdot T_{in} - coef1 \cdot T_{amb} - coef2}{2} \right) \cdot T_{amb}}{\dot{m}} + 3.478 \cdot 10^{-3} \cdot T_{in}^2 + 1.820 \cdot T_{in} \right) \quad (10)$$

$$A \cdot T_{ref}^2 + B \cdot T_{ref} = C \quad (11)$$

$$T_{ref} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A} \quad (12)$$

Las expresiones (8), (9), (10) se corresponden con los coeficientes de las ecuaciones (11) y (12). Teniendo en cuenta los valores nominales de operación, las dos soluciones de (11) serán una positiva y otra negativa. La que proporciona siempre una  $T_{ref}$  positiva, y por tanto, la que se escogará como referencia es la obtenida mediante (12). Nótese cómo la resolución de la ecuación (12) no garantiza que se cumpla el  $DT$  impuesto como restricción. Como se ha comentado previamente, en este trabajo se parte de la premisa de que la consigna óptima en cada instante es aquella que maximiza la temperatura de salida del campo en función de las condiciones cambiantes de operación, considerando que en el rango de temperaturas barrido las pérdidas térmicas no son significativas en comparación con los términos de absorción y transporte de energía por el aceite. Esto permite resolver el problema de optimización en dos fases: en una primera fase se calcula, partiendo de un caudal inicial mínimo (el cual maximiza la temperatura de salida), la consigna con un valor coherente a las condiciones de operación actuales (resolución de la ecuación (12)). Si la consigna de temperaturas máxima obtenida es tal que se viola la restricción del gradiente máximo entre entrada salida, se recalculan iterativamente los

valores de caudal y consigna de temperatura asociada hasta que se cumpla esta restricción, comenzando las iteraciones con un caudal inicial mayor (o bien se forma en una sola iteración una tabla dinámica de correspondencias entre caudales y temperaturas de referencia de modo que la selección del caudal y referencia asociada que cumpla el salto térmico se haga mediante un acceso a dicha tabla). En el caso de que las pérdidas térmicas fueran significativas, la forma más adecuada de calcular la consigna de temperatura sería mediante la resolución de un problema de optimización con restricciones.

Para evitar la inclusión de cambios bruscos en la consigna debidos al paso de nubes, la nueva  $T_{ref}$  se hace pasar por un filtro paso bajo con constante de tiempo típica de 10 minutos. Además, se utilizan valores filtrados de la radiación (media de valores actual y pasados), asignando mayor peso a los valores actuales que a los pasados.

### 3.2 Control por adelanto

Con el objetivo de cancelar las perturbaciones que afectan a la planta durante la operación se ha diseñado una estructura de control por adelanto utilizando las ecuaciones (1), (4), (5), (6) y (7). Tomando como entradas  $T_{ref}$ ,  $T_{in}$ ,  $Irr_{cor}$ ,  $T_{amb}$  se calcula un caudal nominal tal que mantenga la temperatura de salida  $T_{out}$  a un valor igual a la consigna  $T_{ref}$ . Los parámetros  $h$  y  $s$  pueden considerarse constantes puesto que no varían significativamente a lo largo del día, introduciéndose al comienzo de la operación los valores más recientemente medidos. El caudal de aceite que calcula el controlador por adelanto se muestra en la ecuación (12).

$$C_{ff} = h \cdot s \cdot \frac{A_{cor} \cdot Irr_{cor}}{\Delta h \cdot r(T) \cdot 10^{-3}} - H_l \cdot \frac{(T_{ref} - T_{amb})}{\Delta h \cdot r(T) \cdot 10^{-3}} \quad (l/s) \quad (12)$$

### 3.3 Estructura I-PD

Debido a las simplificaciones hechas en la formulación del controlador por adelanto el modelo del sistema no es exacto, y puesto que este controlador no se realimenta con el error entre la  $T_{ref}$  y la  $T_{out}$ , la función de control por adelanto no es capaz de corregir el error, si lo hubiera, entre dichas señales en régimen permanente. Para eliminar ese error se ha añadido una estructura básica I-PD en paralelo con controlador por adelanto. Los parámetros de la estructura de control son:  $K_p = -0.2$   $^{\circ}C/l/s$ ,  $T_i = 200$  s y  $T_d = 40$  s. Los parámetros del I-PD (Ogata, 1998) han sido calculados mediante las reglas heurísticas de Ziegler-Nichols en bucle abierto para un punto nominal de operación y ajustados posteriormente en la propia planta para evitar comportamientos excesivamente oscilatorios. Las reglas de Ziegler-Nichols en bucle abierto se han utilizado en este trabajo como una primera aproximación para encontrar unos valores iniciales de los parámetros del controlador sin buscar unas especificaciones en concreto, habiéndose realizado posteriormente una sintonización más adecuada de

los valores obtenidos utilizando el simulador del campo ACUREX y realizando pruebas reales en planta. En su concepción original, dichas reglas estaban planteadas para el problema de rechazo de perturbaciones, más que para un problema de seguimiento de consignas. En trabajos previos realizados en el campo ACUREX (Camacho *et al.*, 1997), se realizaron estudios que demostraban que se podían utilizar estas reglas en la planta objeto de estudio utilizando para ello datos obtenidos del ensayo de la curva de reacción (la respuesta a escalón en bucle abierto es de tipo sobreamortiguado) para obtener unos parámetros de partida que típicamente provocan un comportamiento excesivamente subamortiguado (más de un 25% de sobreoscilación), proponiéndose en dichos estudios una modificación de los parámetros inicialmente obtenidos con las reglas de Ziegler-Nichols (fundamentalmente una considerable reducción de la ganancia del controlador), que se ha seguido en el presente trabajo.

En el controlador diseñado, la señal manipulada se obtiene mediante la expresión (13).

$$C_{ipd} = \frac{K_p \cdot T_{ref}(s)}{T_i \cdot s} - K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s\right) \cdot T_{out}(s) \quad (13)$$

El uso de una estructura I-PD en vez de un PID clásico se justifica porque en un control I-PD, sólo la parte integral se encuentra en la trayectoria directa (la parte proporcional y derivativa se encuentran en la trayectoria de realimentación). Esta estructura simplifica la función de transferencia del lazo cerrado al no añadirle ceros provenientes del controlador. Además, la idea básica del control I-PD es evitar las señales de control grandes (que provocan fenómenos de saturación) dentro del sistema. Si se llevan las acciones de control proporcional y derivativa al camino de realimentación, es posible elegir valores más grandes para  $K_p$  y  $T_d$  que los que son posibles mediante el esquema de control PID, por lo que en general el comportamiento ante rechazo de perturbaciones será más rápido que en el caso de un controlador PID. En el caso de seguimiento de referencias, como el sistema con el controlador I-PD es equivalente a un sistema con control PID con filtro de entrada, el mismo sistema con un controlador PID tendrá respuestas más rápidas que el sistema con el controlador I-PD correspondiente, siempre y cuando el sistema con el controlador PID no entre en saturación. Como se observa, esta estructura minimiza el riesgo de entrar en saturación, obteniendo en general mejores resultados cuando se efectúan cambios bruscos de consigna.

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se han llevado a cabo varios ensayos en la planta ACUREX de la PSA con la estructura de control mostrada en la Fig. 3. Los resultados obtenidos se muestran en esta sección. Se ha querido destacar especialmente la respuesta de la estructura en la fase de arranque y la respuesta del sistema ante

perturbaciones de radiación y de temperatura de entrada, aunque en todos los ensayos realizados la estructura propuesta ha estado funcionando de forma automática desde el arranque hasta la parada de la operación.

##### 4.1 Fase de arranque

Tal y como se ha mencionado en secciones anteriores, la fase de arranque es muy dura para la mayoría de las estructuras de control que se han implementado en el campo ACUREX debido a los cambios continuos de dinámica que sufre la planta.

A modo de ejemplo, la Fig. 4 muestra la fase de arranque de un ensayo realizado en la planta utilizando un controlador basado en lógica borrosa (Juuso and Valenzuela, 2003). Tal y como se puede observar, la temperatura de entrada inicial sufre variaciones debido a la mezcla de aceite que sale del tanque de almacenamiento con el aceite frío procedente del campo y que se devuelve al campo solar de nuevo sin pasar por el tanque. La temperatura de referencia fue establecida desde el inicio de la operación a 210°C. El controlador implementado pudo llevar la salida a la consigna establecida pero puede observarse como durante más de media hora las oscilaciones de caudal, y por tanto de temperatura, son notables.

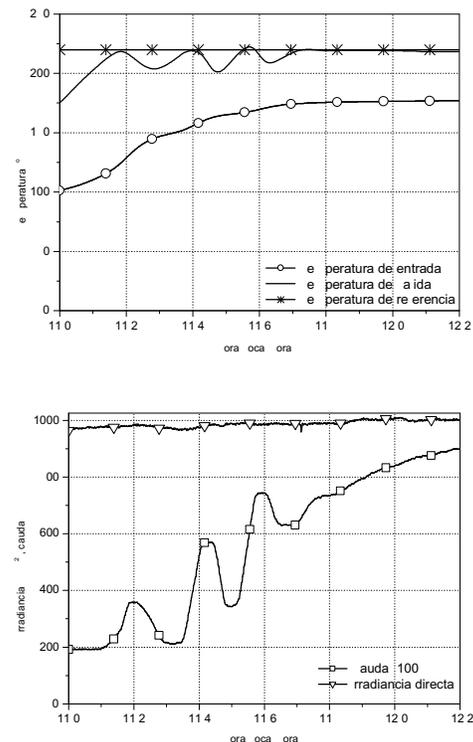


Fig. 4 Detalle de la fase de arranque de un ensayo. Fecha 19-Julio-2001

La Fig. 5 muestra la fase de arranque utilizando la estructura de control diseñada en este trabajo (ver Fig. 3). El generador de consignas calcula una temperatura de referencia teniendo en cuenta la radiación, la temperatura de entrada, el máximo salto

térmico permitido, etc. Se puede apreciar cómo varía  $T_{ref}$  a la vez que se incrementa la temperatura de entrada. La estructura de control propuesta permite el seguimiento de la consigna en todo momento. La fase de arranque es más lenta debido a que la radiación solar era muy baja en comparación con la existente en el ensayo mostrado en la Fig. 4, lo que obligó a la estructura de control a trabajar en régimen de bajo caudal, aumentando el retardo de la respuesta de la planta y la dificultad de control. Durante este ensayo se canceló temporalmente la acción del I-PD pues al estar sus parámetros diseñados para otras condiciones de operación, su comportamiento durante el arranque es agresivo, como ha ocurrido con otros controladores ensayados en la planta, provocando en ocasiones la saturación del caudal.

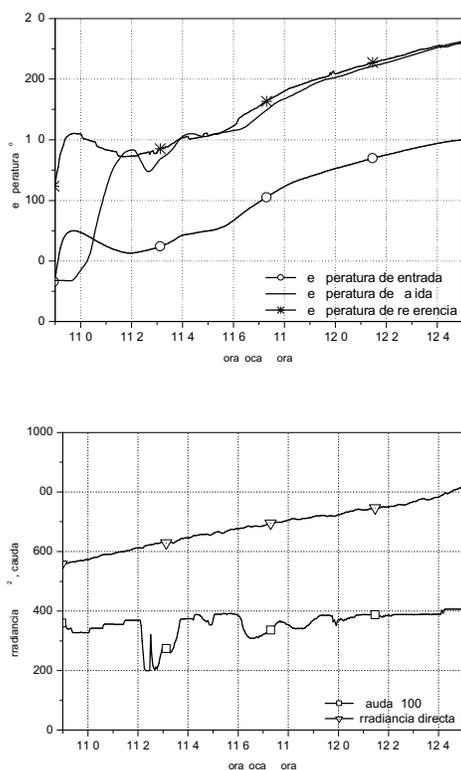


Fig. 5: Detalle de la fase de arranque de un ensayo cancelando temporalmente el I-PD. Fecha 1-Julio-2003

#### 4.2 Respuesta ante perturbaciones

La Fig. 6 muestra un ensayo en el que la variación de la radiación solar es muy acentuada debido a la aparición persistente de nubes. Se puede observar cómo la temperatura de referencia se modifica en función de la radiación disponible en cada instante de muestreo. Tanto el controlador en adelanto como el generador automático de consignas usan un valor filtrado (media de las últimas medidas) de la radiación y este último además filtra la señal de referencia con un filtro paso bajo.

En la parte del ensayo que se corresponde con las 14.5 aproximadamente, una caída de radiación importante provocó que la temperatura de referencia

descendiera considerablemente. Pero una vez que estas condiciones de radiación desaparecieron, el controlador fue capaz de llevar a la planta a las condiciones nominales en un tiempo inferior a 10 minutos, lo cual representa un resultado notable en este tipo de instalación.

La Fig. 7 muestra un día completo de operación desde el arranque hasta la finalización del ensayo. La fase de arranque del ensayo se realizó con la estructura de control mejorada que cancela la actuación del I-PD ante condiciones de posible saturación. Las oscilaciones de caudal han sido reducidas significativamente.

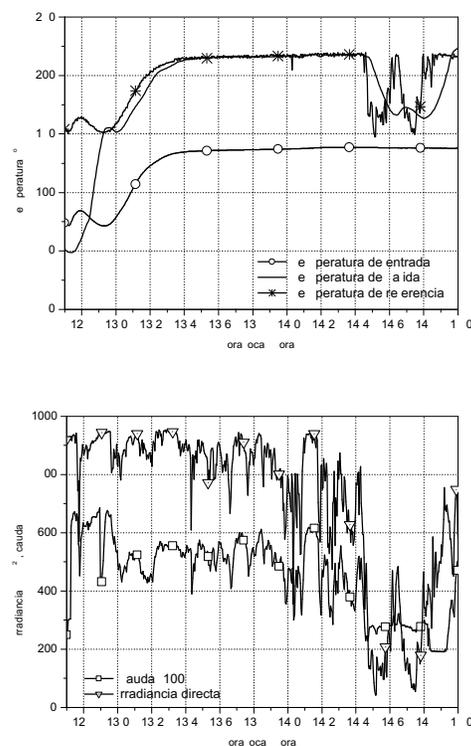


Fig. 6 Detalle de fase de ensayo con perturbaciones de radiación. Fecha 26-Junio-2003

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una estructura de control formada por un generador automático de consigna y un controlador por adelanto en paralelo a un I-PD. El objetivo de esta estructura de control automático es la obtención de la máxima temperatura de salida posible en función de las condiciones de operación y de los límites de seguridad.

Se han mostrado los resultados obtenidos al probar la estructura de control en la planta ante determinadas situaciones: arranque, variaciones en la temperatura de entrada y variaciones en la radiación. Los ensayos demuestran el buen comportamiento del generador de consignas calculando una temperatura de referencia ante cada situación. El controlador por adelanto ha sido evaluado en distintas condiciones de operación en paralelo con un regulador I-PD. En futuros trabajos se pretende utilizar la misma idea en el

ámbito del control predictivo, donde se hará uso de modelos de predicción de las perturbaciones para dar respuesta a perfiles variables de necesidades energéticas.

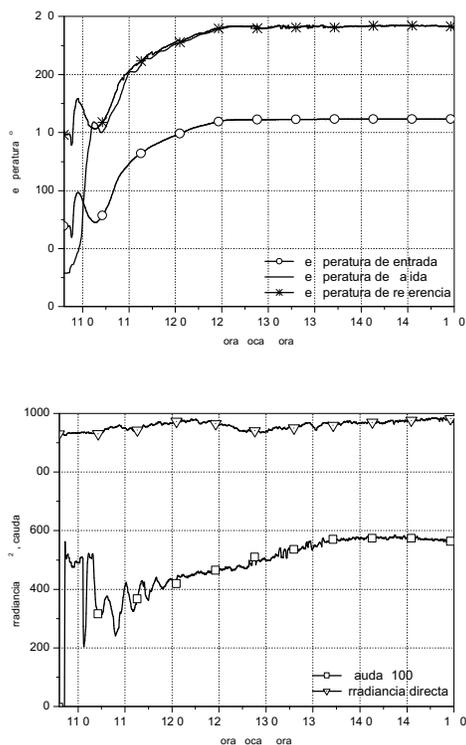


Fig. 7 Ensayo completo. Fecha 27-Junio-2003

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el ámbito del EU Improving Human Potential Programme y del acuerdo específico de colaboración entre la Plataforma Solar de Almería y el Grupo de Investigación "Automática, Electrónica y Robótica" de la Universidad de Almería (TEP197) titulado "*Desarrollo de sistemas y herramientas de control para plantas termosolares*" y de los proyectos financiados por la MCYT DPI2001-2380-C02 y DPI2002-04375-C03.

#### REFERENCIAS

- Ajona, J.I. (1998). *Solar Thermal Electricity Generation*, capítulo 1, Ed. CIEMAT, Madrid.
- Berenguel, M., Camacho, E.F. (1996). Frequency-based adaptive control of systems with antiresonance modes. *Control Engineering Practice*, 4(5), 677-684.
- Camacho, F., Berenguel, M., Rubio, F. (1997) *Advanced Control of a Solar Plants*. Ed. Springer-Verlag, London, Great Britain.
- Carmona, R. (1985). *Análisis, Modelado y Control de un Campo de Colectores Solares Distribuidos con Sistema de Seguimiento de un eje*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla

Duffie, J.A. Beckman, D. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.

Juso E., Valenzuela L. (2003), *Adaptive Intelligent Control of a Solar Collector Field*. En Final Programme & Proceedings of EUNITE 2003, Ed. Wissenschaftsverlag Mainz, Aachen, pp. 26-35.

Meaburn, A., Hughes F.M. (1993), *Resonance characteristics of distributed solar collector fields*. *Solar Energy*, **51**, 215-221

Ogata, K. (1998) *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice Hall.

*The Improving Human Potential Programme*. Ed. CIEMAT. 2002, 2003

*Training and Mobility of researchers programme at Plataforma Solar de Almería*. Ed. CIEMAT. 1997,1998.

Zarza, E. (1995), *Solar Thermal Desalination Project Phase II Results & Final Project Report*. CIEMAT.