

CONTROL DE CAMPOS DE COLECTORES SOLARES

Francisco R. Rubio* Eduardo F. Camacho*
Manuel Berenguel**

* Dept. Ingeniería de Sistemas y Automática.
Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Universidad de
Sevilla. Camino de los Descubrimientos s/n. 41092-Sevilla.
Correos: {rubio,eduardo}@esi.us.es

** Dept. de Lenguajes y Computación. Área de Ingeniería
de Sistemas y Automática. Universidad de Almería.
Carretera Sacramento s/n. 04120-La Cañada, Almería.
Correo: beren@ual.es

Resumen: En este artículo se presenta una visión general sobre diferentes algoritmos básicos de control, aplicados durante los últimos veinticinco años al control de un campo de colectores solares distribuidos tipo ACUREX, situado en la Plataforma Solar de Almería. Se tratan diferentes aspectos del problema de control, desde el modelado del campo al desarrollo y aplicación real de varios esquemas de control, todos ellos incorporando de forma explícita un controlador por adelanto para cancelación de perturbaciones basado en un balance energético de estado estacionario. Aunque los campos de colectores solares distribuidos presentan una gran riqueza dinámica, incluyendo comportamientos resonantes a altas frecuencias, el trabajo se ha centrado en esquemas que hacen uso de modelos de bajo orden del sistema (y que por tanto representan el comportamiento a bajas frecuencias), o bien se basan en la experiencia sin uso explícito de modelos, mostrándose algunos resultados representativos de cada uno de ellos. El trabajo incluye también un listado completo de trabajos publicados en este ámbito por diversos grupos de investigación a nivel internacional. *Copyright* © 2006 CEA-IFAC

Palabras clave: Planta Solar, Control Automático, Control de temperatura, Energía Solar Térmica.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace algún tiempo y fundamentalmente tras la crisis energética, se ha puesto de manifiesto un creciente interés por el aprovechamiento de fuentes energéticas no exploradas hasta ahora, o que lo han sido insuficientemente. Tal es el caso de la energía solar, y concretamente de las plantas eléctricas termosolares.

Las Centrales Eléctricas Termosolares (CET), son sistemas empleados para obtener la energía eléctrica a partir de la energía solar mediante la transformación previa de ésta en energía térmica. El diseño de este tipo de centrales no comienza hasta 1977 (Ruiz y Gómez 1982), poniéndose en marcha las primeras en 1981.

La diferencia fundamental entre una planta convencional y una planta solar es que la energía

primaria no puede ser manipulada por el hombre, es intermitente y cuando se encuentra disponible, resulta cara de transformar. Por todo ello, en una planta solar se requiere un sofisticado sistema de control capaz de mantener unas especificaciones más rigurosas que en el caso de un control clásico.

Fundamentalmente existen dos tipos de CET, según el número de componentes que transforman la energía solar en térmica; si es sólo uno, se denominan sistemas de receptor central y si cada captador dispone de su propio dispositivo de transformación, se denominan sistemas de colectores distribuidos. Este artículo se centrará en las CET de colectores distribuidos y particularmente en el sistema de control necesario para conseguir un aprovechamiento óptimo de la energía disponible.

Durante los últimos veinticinco años se ha realizado un considerable esfuerzo por parte de muchos grupos de investigación con el objetivo de mejorar la eficiencia de las plantas termosolares con colectores distribuidos desde el punto de vista de control y optimización. Muchos de estos trabajos han utilizado el campo solar ACUREX situado en la Plataforma Solar de Almería, que forma parte del programa de grandes instalaciones de la Unión Europea.

En este artículo se presenta la descripción de dicha planta, con los modelos utilizados y algunas de las muchas técnicas de control que se han ensayado sobre dicho campo. La descripción de los algoritmos de control se realiza según el orden cronológico en que se desarrollaron y trata fundamentalmente las aproximaciones más cercanas a la práctica industrial y que no tratan de compensar unas características especiales de este tipo de plantas, como es la presencia de modos antiresonantes que se pueden excitar en el caso de exigir respuestas rápidas al sistema en bucle cerrado o en presencia de patrones de perturbaciones con paso intermitente de nubes que exciten también las altas frecuencias del sistema. Por tanto, los diseños mostrados en este artículo se centran en el desarrollo de esquemas de control que permitan alcanzar una solución de compromiso entre prestaciones y sencillez. Se hará también referencia a trabajos que tratan explícitamente la presencia de dichos modos antiresonantes. De hecho, al final del trabajo se incluye una extensa lista de referencias, donde pueden encontrarse la mayoría de artículos que han desarrollado y probado alguna técnica de control sobre el campo de colectores distribuidos ACUREX de la Plataforma Solar de Almería.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En la Plataforma Solar de Almería se dispone de un campo de captadores cilindroparabólicos con

seguimiento solar en elevación del tipo ACUREX. El campo Acurex está formado por colectores solares distribuidos del tipo Acurex, modelo 3001. Estos colectores son parabólicos y con seguimiento del sol en un solo eje (elevación). El campo está dispuesto en 20 filas de colectores, las cuales forman 10 lazos paralelos. En total en el campo hay 480 módulos orientados de este a oeste y la superficie total de espejos es 2674 m^2 . La figura 1 muestra una fotografía de este campo.

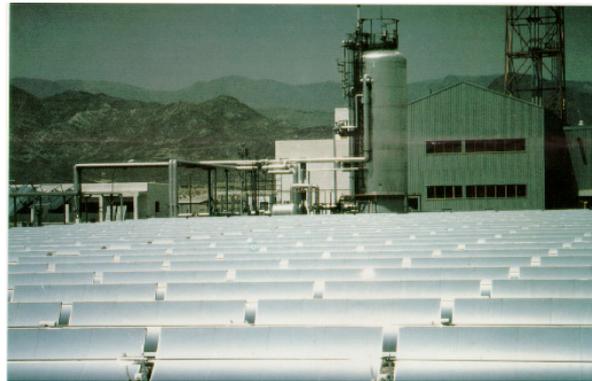


Figura 1. Campo de colectores ACUREX

Los tubos receptores, situados en la línea focal, emplean el flujo solar concentrado para calentar un aceite térmico, proveniente de la parte inferior de un tanque de almacenamiento donde el aceite se encuentra térmicamente estratificado, y a cuya parte superior es devuelto una vez ha aumentado su temperatura. El tanque está conectado a varios sistemas para utilizar la energía almacenada en él (turbina y planta desaladora solar, fundamentalmente). Un diagrama simplificado del campo de colectores solares puede verse en la figura 2.

El campo está provisto con un sistema de seguimiento del sol que mueve los espejos alrededor de un eje paralelo a aquél en el que se sitúa la tubería. El mecanismo de seguimiento puede alcanzar tres posibles estados:

- *Seguimiento ('track')*: El mecanismo sigue el sol y los colectores enfocan sobre la tubería.
- *Desenfocado ('desteer')*: El mecanismo sigue el sol, pero desenfoca el colector varios grados, de forma que el tubo receptor se sitúa fuera de la zona focal y el fluido no se calienta.
- *Bocabajo ('stow')*: El mecanismo lleva al colector a una posición invertida, no existiendo ningún tipo de seguimiento del sol. A este estado se llega al final del día o si una alarma grave se produce.

Como puede comprenderse, las condiciones ambientales a que está sometida una CET son en general distintas de las condiciones de diseño mencionadas. Por su propia naturaleza, la disponibilidad de energía solar depende de la fecha y

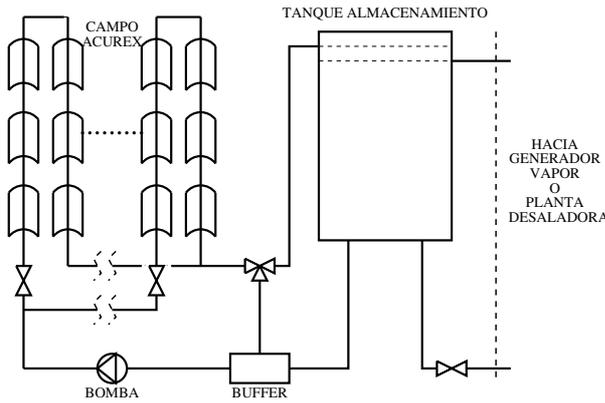


Figura 2. Diagrama esquemático del campo de colectores

hora, de las condiciones meteorológicas y demás perturbaciones existentes.

La planta está sometida a perturbaciones en la energía de entrada, que pueden ser lentas, debidas a variaciones de insolación a lo largo de un día claro, o bien bruscas, causadas fundamentalmente por la aparición de nubes y por variaciones de la temperatura de entrada al campo en la puesta en marcha del sistema de conversión de potencia. Todas estas perturbaciones obligan a variar continuamente el flujo de control, lo que a su vez provoca que el tiempo de residencia del fluido en el campo sea variable.

De todo lo expuesto, se desprende que el proceso a controlar es un sistema fuertemente no-lineal con retardo variable en el tiempo y dinámica cambiante con el punto de trabajo. Para una descripción más detallada de la planta ver por ejemplo (Camacho *et al.*, 1997b).

3. MODELO DINÁMICO DEL CAMPO

Con el objeto de poder evaluar más fácilmente y con más rapidez los distintos controladores posibles, es de interés disponer de un modelo dinámico de la planta, que permita simular una gran variedad de comportamientos, así como de perturbaciones.

En un primer paso se diseñó un modelo de parámetros concentrados simplificado del campo, desarrollándose posteriormente un modelo de parámetros distribuidos que constituye una descripción más aproximada del comportamiento del campo. Ambos modelos han sido de gran utilidad en los ámbitos del análisis de las características dinámicas de la planta, de la simulación y del control del campo.

3.1 Modelo de parámetros concentrados

Supuesta una representación concentrada de la planta, el cambio de energía interna del campo puede ser descrito de forma muy aproximada por:

$$C \frac{dT}{dt} = \eta_o GI - \dot{V} P c_p (T - T_i) - H_l (T_m - T_a) \quad (1)$$

donde T es la temperatura de salida del campo solar, I la radiación efectiva, T_i la temperatura de entrada al campo solar, T_m la temperatura media entrada-salida y T_a la temperatura ambiente. El producto $P c_p$ es una función de la temperatura, pero se aproxima a $1924 \text{ kJ/l } ^\circ\text{C}$. A partir de datos experimentales, se estimó que el coeficiente de pérdidas térmicas H_l es de $1.05 \text{ kW/}^\circ\text{C}$. Los otros parámetros se ajustaron empíricamente usando datos de entrada-salida al campo. Del resultado de la identificación, se obtuvo el parámetro $C=2267 \text{ kW/}^\circ\text{C}$ y $\eta_o R = 1322 \text{ m}^2$.

3.2 Modelo de parámetros distribuidos

Un bucle ACUREX está formado por cuatro colectores de doce módulos, conectados en serie de forma apropiada. El bucle tiene 172 m de longitud, siendo de 142 m la parte activa del bucle y el resto 30 m pasiva. Debido a la complejidad del sistema y a la existencia de no-linealidades, se ha desarrollado un modelo numérico para la simulación de dicho sistema, habiéndose hecho las siguientes hipótesis:

- Las propiedades del aceite son consideradas como funciones de la temperatura, varían con el tiempo y el espacio.
- El flujo incidente de calor en cada sección se supone que es circunferencialmente uniforme e igual al valor medio.
- Las variaciones de temperatura radial en la pared del tubo son despreciadas. Esta suposición es razonable para una pared fina que tiene una buena conductividad térmica.
- El flujo de aceite y la irradiancia son consideradas como funciones del tiempo y en cada instante son las mismas en cada elemento (se supone fluido incompresible).
- Las pérdidas por conducción de calor axial en ambos lados de la pared y del fluido son despreciadas. La conducción axial en el tubo debe ser pequeña ya que la pared es fina, teniendo una alta resistencia térmica. En el fluido la conducción axial es relativamente pequeña porque la conductividad del aceite es pobre.

Con las hipótesis anteriores y aplicando la conservación de la energía en el tubo de metal de un volumen de longitud dx sobre un intervalo de tiempo dt , se tiene:

$$\rho_m c_m A_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = I \eta_o G - P_{rc} - \pi D_i H_t (T_m - T_f) \quad (2)$$

Similarmente para un elemento de fluido:

$$\rho_f c_f A_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f c_f \dot{V} \frac{\partial T_f}{\partial x} = \pi D_i H_t (T_m - T_f) \quad (3)$$

En la ecuaciones anteriores el subíndice m se refiere al metal y el f al fluido y:

t : tiempo (s)

x : espacio (m)

ρ : densidad (kg/m³)

c : calor específico (J/kgK)

A : área transversal (m²)

T : temperatura (K, °C)

\dot{V} : flujo volumétrico impulsado por la bomba (m³/s)

I : irradiación solar (W/m²)

η_o : eficiencia óptica de los espejos

G : apertura óptica de los espejos (m)

T_a : temperatura ambiente (K, °C)

H_l : coeficiente global de pérdidas térmicas (W/mK)

H_t : coeficiente de transmisión metal-fluido (W/m²K)

D_i : diámetro interior de los tubos (m)

P_{rc} representa la suma de pérdidas térmicas radiativas y conductivas, que habitualmente se modelan como una relación de naturaleza conductiva lineal de la forma $H_l(T_m - T_a)$.

Las ecuaciones que describen el comportamiento en un elemento pasivo son similares, excepto que la entrada de energía solar es cero y el coeficiente de pérdidas es mucho menor.

Un modelo de parámetros distribuido dado por las ecuaciones anteriores y otros similares pueden encontrarse en (Klein *et al.*, 1974; Rorres *et al.*, 1980; Orbach *et al.*, 1981; Carotenuto *et al.*, 1985; Carmona, 1985; Carotenuto *et al.*, 1986; Camacho *et al.*, 1988; Berenguel *et al.*, 1994; Camacho *et al.*, 1997b).

A partir de datos reales de la planta se han determinado las distintas constantes y coeficientes que aparecen en las ecuaciones anteriores, siendo ajustados muchos de ellos a funciones polinomiales de la temperatura, mediante un método de mínimos cuadrados. Los detalles se encuentran en (Camacho *et al.*, 1988) y en (Berenguel *et al.*, 1994).

4. ALGORITMOS DE CONTROL

Como se ha indicado en la introducción de este artículo, se van a exponer algunos algoritmos de control básicos en orden cronológico, comenzando por estrategias de control por prealimentación o en adelante, control PID, control adaptativo, control predictivo generalizado y control borroso. Se incluirá finalmente una sección donde se comentan las características de otros esquemas de control más avanzados desarrollados para este tipo de plantas.

4.1 Control en adelante

A partir de la representación concentrada de la planta (1), se obtiene en el régimen permanente:

$$\dot{V} = \frac{\eta_o G I - H_l (T_m - T_a)}{P c_p (T_r - T_i)}$$

Esta última ecuación puede ser aproximada por:

$$\dot{V} = \frac{K_1 G I - K_2}{T_r - T_i}$$

Esta expresión constituye el cálculo del flujo como función de la temperatura de referencia T_r , temperatura de entrada T_i , reflectancia η_o y de la irradiancia efectiva I , siendo utilizada para el control en adelante (*feedforward*). Las constantes K_1 y K_2 , han sido determinadas experimentalmente, teniendo los valores de $K_1 = 0,93$ y $K_2 = 155$ (Rubio *et al.*, 1986). Así se han probado otras estrategias de control en adelante (Camacho *et al.*, 1997), pero no han dado tan buen resultado como el control en adelante en serie descrito.

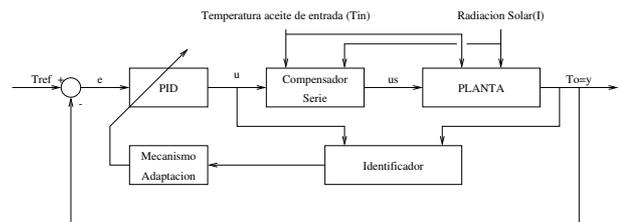


Figura 3. Estructura de control con compensación en serie

Esta estructura de control por adelante ha demostrado ser muy efectiva en la gran mayoría de ensayos realizados en la planta solar, y ha sido utilizado en numerosas estrategias de control probadas (Camacho *et al.*, 1994a,b; Rubio *et al.*, 1995; Camacho y Berenguel, 1997; Ke *et al.*, 1998; Luk *et al.*, 1999; Cardoso *et al.*, 1999; Johansen y Storaas, 2002; etc.). Los controladores PID como los tratados en la siguiente sección combinados con controladores por adelante como los tratados en ésta son la base de los sistemas de control de

la nueva generación de plantas solares con generación directa de vapor (Valenzuela *et al.*, 2004; Valenzuela *et al.*, 2005a,b).

4.2 Controlador PID

El proceso en consideración presenta un retardo variable con el flujo de entrada. Suponiendo que la proceso se modela por la ecuación $y(k) = bu(k-d)$, donde d es el retardo en períodos de muestreo y b la ganancia del sistema, el controlador que resulta por control en tiempo mínimo, tiene por expresión (Isermann, 1981):

$$u(k) = u(k-d) + e(k)/b \quad (4)$$

Si en vez de utilizar este controlador directamente, se aproxima un regulador PI para que tenga la misma respuesta, se obtiene:

$$u(k) = u(k-1) + q_0e(k) + q_1e(k-1) \quad (5)$$

donde :

$$\begin{aligned} q_0 &= 1/(2b) \\ q_1 &= -q_0(d-2)/d \end{aligned} \quad (6)$$

Este regulador, puede demostrarse (Isermann, 1981) que es menos sensible al error en la exactitud del retardo, por ello resulta más conveniente su utilización que el controlador (ecu 4), dada las características del proceso. Por todo ello en el bucle de realimentación se ha utilizado un PI. También ha de tenerse en cuenta que cuando exista un error en la determinación del retardo, es mejor considerarlo mayor del que se prevea, en orden a asegurar la estabilidad.

4.3 Controlador PI por asignación de polos

Las características del proceso son tales que es muy difícil conseguir controlarlo mediante un controlador con parámetros constantes (Camacho *et al.*, 1997b). Por tanto, una de las posibles opciones que se presentan a la hora de controlarlo utilizando controladores sencillos es mediante el control adaptativo. Desde el punto de vista de diseño del controlador adaptativo autoajustable, el proceso puede modelarse como un sistema de primer orden, que relaciona los cambios en el flujo de aceite con la temperatura de salida (ver Camacho *et al.*, 1997b). Siendo la función de transferencia aproximada por:

$$g(s) = \frac{K}{(1 + \tau s)} e^{-s\tau_d} \quad (7)$$

El retardo τ_d , constante de tiempo τ y ganancia K del sistema varía con el flujo de aceite y en el punto de operación a bajo flujo el retardo es aproximadamente el doble que el retardo a

flujo máximo. Puede comprobarse (Rubio, 1985), que un camino para adaptar esta variación en el tiempo de retardo es usar un modelo de la forma,

$$g(z) = \frac{(b_0 + b_1z^{-1})}{(1 - az^{-1})} z^{-2} \quad (8)$$

El período de muestreo se escoge igual al tiempo de retardo mínimo. De esta forma el mínimo retardo está representado por el modelo con el parámetro $b_1 = 0$. Cuando $b_0 = 0$, el modelo representa el máximo tiempo de retardo de dos períodos. Para los valores del tiempo de retardo donde τ_d no sea un múltiplo entero del período de muestreo, por ejemplo $T < \tau_d < 2T$, el factor $(b_0 + b_1z^{-1})$ actúa como una aproximación discreta de Pade de primer orden del retardo. Basado en este modelo se diseña el siguiente algoritmo autoajustable por asignación de polos.

La función de transferencia de un controlador PI viene dada por:

$$k(z) = \frac{g_0(1 - g_1z^{-1})}{(1 - z^{-1})} \quad (9)$$

Escogiendo el cero del controlador que cancele el polo del proceso, o sea, haciendo $a = g_1$, El polinomio característico en bucle cerrado, $P(z)$, es de la forma:

$$P(z) = z^3 - z^2 + g_0b_0z + g_0b_1$$

Si al sistema en bucle cerrado se le especifica que tenga un polo en $z = A$, entonces del polinomio característico $P(z)$ evaluado en A , se deduce que g_0 hay que elegirlo tal que:

$$g_0 = \frac{A^2(1 - A)}{(b_0A + b_1)} \quad (10)$$

Entonces conociendo a, b_0 y b_1 del modelo, los parámetros del controlador g_0 y g_1 pueden calcularse especificando un polo dominante en bucle cerrado en $z = A$. Analizando $P(z)$ puede deducirse la localización de los otros dos polos del sistema.

$$P(z) = [z^2 - (1 - A)z + g_0b_0 - A(1 - A)](z - A)$$

A partir del lugar de las raíces del sistema, se tiene que aparte del polo en $z = A$, el sistema tendrá otros dos polos reales, uno negativo y otro positivo. Resolviendo $P(z)$ se puede validar la localización de estos polos, comprobándose que efectivamente corresponden a modos que decaen rápidamente y que el polo en $z = A$ es el polo dominante.

Algunos valores típicos calculados han sido:

A	g_0	g_1
0,9 a	1,539	-1,3851
0,95 a	1,2398	-1,1778

Los coeficientes del regulador g_0 y g_1 se saturan para evitar sobreoscilaciones en las ocasiones en

que el identificador no funcione correctamente, debido al paso de nubes u otras perturbaciones.

4.4 Controlador autoajustable

Se ha desarrollado un algoritmo de control adaptativo autoajustable, versión explícita, mediante el método de asignación de polos desarrollado en la sección anterior. Los parámetros del modelo del sistema se determinan en línea mediante el método de mínimos cuadrados recursivos. El algoritmo de estimación de parámetros incorpora factorización UDU (Bierman, 1977) y factor de olvido variable (Fortescue *et al.*, 1981). La función de transferencia en z del modelo puede representarse mediante la ecuación en diferencias de la forma:

$$y(n) = a y(n-1) + b_o u(n-2) + b_1 u(n-3) + \delta$$

El término δ es una constante introducida para tener en cuenta los valores medios de las señales de entrada y salida. Las perturbaciones del sistema son tales que puede emplearse un modelo determinista.

Desde el punto de vista de la identificación el sistema anterior tiene cuatro parámetros a determinar: $[a \ b_o \ b_1 \ \delta]$.

Un rasgo particular del sistema es que se necesita incluir un término de adelanto en el bucle de control, como se ha precisado en la sección anterior. El modelo del proceso descrito está basado en la relación entre los cambios de la temperatura de salida y los cambios en el flujo de aceite; pero la temperatura de salida del proceso está influida por los cambios de otras variables del sistema, tales como, la irradiancia solar y la temperatura de entrada del aceite. Si cualquiera de estas variables cambia durante la fase de indentificación, ello introduce un cambio en la salida del sistema que no está motivado por cambios en el flujo, por que las variaciones que se producirían en los parámetros estimados serían innecesarias y el modelo se desajustaría.

Dado que la irradiación solar y la temperatura de entrada pueden medirse, este problema puede reducirse mediante la incorporación de un término de adelanto, calculado para las condiciones de régimen permanente, el cual realiza un ajuste en el flujo de entrada, encaminado a eliminar el cambio en la temperatura de salida causado por la variación en la irradiancia solar y la temperatura de entrada.

Si el término en adelanto fuese perfecto los cambios en la temperatura de salida sólo serían debido a los cambios en la señal de entrada. Evidentemente la eliminación exacta de estos cambios es imposible, pero este término reduce considerablemente los mayores problemas inherentes en el modelo

planteado y permite una mejor identificación de los parámetros de este.

La señal del término en adelanto también produce beneficios cuando hay perturbaciones en la irradiancia solar y en la temperatura de entrada, pero la principal razón para incluir este término es para preservar la validez del modelo del sistema asumido en el algoritmo de control adaptativo autoajustable.

4.5 Controlador PID adaptativo

Se ha realizado un desarrollo teórico paralelo al del regulador PI por asignación de polos con el fin de ensayar un regulador PID adaptativo.

La función de transferencia puede escribirse:

$$G_{pid}(s) = K_{pid} \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Para pasar al dominio discreto se utiliza la aproximación de Euler para el término integral y la rectangular hacia detrás para el derivativo incluyendo filtro en la acción derivada (Aström y Wittenmark, 1989).

$$u_k = K_{pid} \left(1 + \frac{T_m}{T_i(z-1)} + \left(\frac{T_d}{T_m + \frac{T_d}{N}} \right) \left(\frac{z-1}{z - \frac{T_d}{(NT_m + T_d)}} \right) \right)$$

$$e_{ik} = \frac{1}{z-1} e_k$$

$$e_{dk} = \frac{z-1}{z - \frac{T_d}{(NT_m + T_d)}} e_k$$

Para calcular los parámetros característicos (ganancia del controlador, tiempo integral y derivativo) se han utilizado las reglas de Ziegler-Nichols (Z-N) en bucle abierto. Los dos mecanismos de adaptación usados han sido:

1. Usar tiempos integral y derivativo fijos, adaptando sólo la ganancia del controlador (dado que no se puede con un modelo del sistema de primer orden estimar el retardo puro), pero tomándola un cuarto (para evitar comportamiento oscilatorio) de la usada por el método de Z-N en bucle abierto.
2. Se adapta la ganancia, tiempo integral y derivativo añadiendo un cero a la función de transferencia para estimar un retardo variable, como se indica en (Camacho *et al.*, 1992).

$$g(z) = z^{-2} \frac{(b_0 + b_1 z^{-1})}{(1 - a z^{-1})}$$

Dado que el período de muestreo se escoge igual al mínimo valor del retardo, éste se representa en el modelo con $b_1 = 0$. Cuando $b_0 = 0$ el modelo tiene un retardo máximo de dos períodos de muestreo. Para valores

del retardo no múltiplos enteros del período de muestreo, el numerador actúa como una aproximación discreta de Pade a un retraso.

Prácticamente todos los controladores PID que se han ensayado en la planta solar incorporan el control por adelanto en serie con el proceso. En (Cirre *et al.*, 2004) se ha ensayado una estructura I-PD en combinación con un control por adelanto y un bloque para generación automática de consignas. En general, los controladores PID se han implementado dentro de estructuras de control más complejas. Ejemplos son controladores PID adaptativos o basados en ajuste por tabla de ganancias, borrosos, etc. (Camacho *et al.*, 1992; Camacho *et al.*, 1997b; Cardoso *et al.*, 1999; Henriques *et al.*, 1999a,b; Cirre *et al.*, 2003; Johansen y Storaas, 2002).

4.6 Controlador predictivo generalizado (GPC)

En esta sección se expone un método sencillo para aplicar GPC adaptativo. Una descripción detallada del método puede encontrarse en (Camacho *et al.*, 1994a; Camacho y Bordóns, 1995; Camacho *et al.*, 1997b). Este método simplificado disminuye la complejidad de cálculos que hay que realizar a la hora de aplicar un controlador predictivo adaptativo. El método hace uso del hecho de que un controlador predictivo generalizado da lugar a una ley de control con pocos parámetros. Estos parámetros pueden ser calculados en el rango de interés de los parámetros del proceso. Se usa una función que aproxima los parámetros reales del controlador y que implica menor esfuerzo computacional.

Este controlador minimiza una función de coste de la forma:

$$J = E \left\{ \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_3} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \right\} \quad (11)$$

donde N_1 y N_2 son los horizontes mínimo y máximo de predicción, N_3 es el horizonte de control, $\hat{y}(t+j|t)$ son las predicciones de las salidas futuras estimadas con datos conocidos hasta el instante actual t , $w(t+j)$ son las referencias futuras (supuestas conocidas), δ es la secuencia de ponderación de errores de seguimiento, λ la secuencia de ponderación del esfuerzo de control y $\Delta u(t+j-1)$ son los incrementos de control futuros, que son los que se obtienen tras el proceso de optimización. De acuerdo con el método descrito en (Camacho *et al.*, 1994a; Camacho y Bordóns, 1995) y los requerimientos para control adaptativo se escoge un modelo CARIMA.

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t-1)z^{-d} + C(z^{-1})\frac{\varepsilon(t)}{\Delta} \quad (12)$$

que para el caso concreto que nos ocupa, A, B y C son los polinomios:

$$A(z^{-1}) = 1 - az^{-1} ; B(z^{-1}) = b ; C(z^{-1}) = 1$$

con $d = 1$. Este esquema permite acción integral para eliminar *offsets* en la señal de salida.

$$(1 - az^{-1})y(t) = bz^{-1}u(t-1) + \frac{\varepsilon(t)}{\Delta} \quad (13)$$

Considerando el retardo d , se escogen $N_1 = d + 1$, $N_2 = d + N$ y $N_3 = N$. En nuestro caso $N_1 = 2$ y $N_2 = 16$. El rango de posibles valores de λ se ha obtenido vía simulación (Camacho *et al.*, 1994a) y es ($3 \leq \lambda \leq 7$). Si λ disminuye se obtienen controladores más rápidos.

Si $\hat{y}(t+j|t)$ y $\hat{y}(t+j-1|t)$ son conocidas, como las componentes de los ruidos están todas en el futuro, el mejor valor esperado para $\hat{y}(t+j+1|t)$ viene dado por:

$$\hat{y}(t+j+1|t) = (1+a)\hat{y}(t+j|t) - a\hat{y}(t+j-1|t) + b\Delta u(t+j-1) \quad (14)$$

Como se deduce en (Camacho y Bordóns, 1995), si la secuencia de referencias futuras, $w(t+j)$, no se conoce y se considera igual a la referencia actual $r(t)$, el incremento de control $\Delta u(t)$ puede escribirse como:

$$\Delta u(t) = l_1\hat{y}(t+1|t) + l_2y(t) + l_3r(t) \quad (15)$$

Los coeficientes l_1, l_2, l_3 , son funciones de $a, b, \delta(i)$ y $\lambda(i)$. Si se diseña el GPC considerando que el proceso tiene ganancia estática unidad, los coeficientes en (15) dependerán sólo de $\delta(i)$ y $\lambda(i)$ (que se suponen fijos) y del polo del proceso que variará en el caso de control adaptativo. Haciendo esto, se usa una secuencia de ponderación normalizada que se corregirá de forma adecuada en sistemas con ganancia estática distinta de la unidad.

El valor de $\hat{y}(t+1|t)$ se obtiene usando el predictor descrito en (14). El esquema de control propuesto puede verse en la figura 4. Los parámetros estimados del proceso se usan para calcular los parámetros del controlador (l_1, l_2, l_3) vía un mecanismo de adaptación.

La forma estándar de calcular los parámetros del controlador sería calculando una serie de matrices y resolviendo una ecuación matricial seguido de la generación de la ley de control de la ecuación (15). Esto trae consigo la triangularización de una matriz $N \times N$, que es prohibitivo en aplicaciones en tiempo real.

Como se sugiere en (Camacho *et al.*, 1994a, Camacho y Bordóns, 1995), los coeficientes del con-

en las instalaciones. De hecho, muchos autores indican que una gran ventaja de los controladores borrosos es la posibilidad de convertir la experiencia y conocimiento del control manual de procesos a algoritmos de control. Otra ventaja es la fácil realización del controlador si se eligen convenientemente las funciones necesarias. Se ha demostrado (ver por ejemplo Sudkamp y Hammell II, 1994) que si se utilizan funciones de inferencia centradas triangulares, la cantidad de cálculo necesario es independiente del número de reglas del controlador.

Desde la publicación de Mamdani presentando un controlador borroso para el control de una planta piloto (Mamdani, 1974), han aparecido en la literatura infinidad de aplicaciones de este tipo de controladores, ver por ejemplo (Kickert *et al.*, 1976), (Larsen, 1981), (King y Mamdani, 1981), (Yasumobu *et al.*, 1984), (Scharf, 1983-1985). Una introducción extensa al desarrollo histórico del control borroso, estado y conceptos, puede encontrarse en (Lee, 1990*a,b*).

En este apartado se describe el desarrollo de un controlador borroso directo, que trata en cierta medida de desarrollar un esquema de control tipo PID no-lineal, incorporando de nuevo el controlador por adelantado en serie introducido en la sección 4.1, que permite cancelar gran parte de las perturbaciones manteniendo el punto de funcionamiento prescrito.

Un controlador borroso está compuesto por un conjunto de reglas más las interconexiones necesarias entre las variables medidas y las variables de control, que puede representarse como se indica en la figura 5, donde se distinguen tres partes: el bloque de pre-procesado lógico (“conversión a borroso”); el bloque de control con el mecanismo de inferencia, y el bloque de post-procesado lógico (“reducción a real”).



Figura 5. Esquema de Inferencia Borroso

Si se utiliza partición triangular, las variables de entrada y salida se subdividen en funciones de pertenencia de la forma $\mu_{A_i}(x) =$:

$$\begin{cases} (x - a_{i-1}) / (a_i - a_{i-1}) & \text{if } a_{i-1} \leq x \leq a_i \\ (-x + a_{i+1}) / (a_{i+1} - a_i) & \text{if } a_i \leq x \leq a_{i+1} \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (17)$$

y la reducción a real se puede realizar de la forma:

$$z = \frac{\mu_{A_i}(x)c_r + \mu_{A_{i+1}}c_s}{\mu_{A_i}(x) + \mu_{A_{i+1}}} \quad (18)$$

En el caso de la aplicación al campo de colectores solares ACUREX, el control borroso se aplica en forma incremental, es decir, se obtiene el incremento de la señal de control necesario para la entrada al proceso.

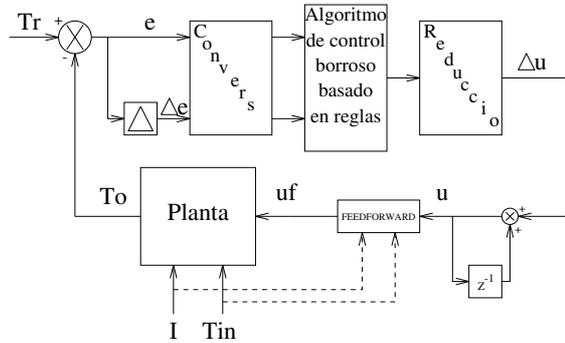


Figura 6. Esquema de control borroso

En la figura 6 puede verse el esquema completo de control del proceso, donde se utiliza también el control en adelanto comentado anteriormente. El error entre la salida de la proceso y la referencia (e) y su incremento (Δe) son las entradas del controlador borroso y la salida del controlador es el incremento de la señal de control (referencia de temperatura para el control en adelanto).

El universo de discretización juega un papel importante para el buen comportamiento del controlador. En este caso, la discretización se ha elegido teniendo en cuenta el rango de funcionamiento del proceso (flujo entre 2 y 12 l/s) y la temperatura de salida con un máximo de 300 °C. De hecho, ésta es otra característica de los controladores tipo PID borroso, ya que, al igual que los controladores PID industriales, que incorporan refinamientos tales como el *anti-windup*, la limitación del efecto del ruido en la acción derivada y la presencia de saturación, los PID borrosos pueden concebirse con estas restricciones, limitando el universo de discurso de las distintas variables tratadas. Es más, tal y como se ha llevado a cabo la aplicación presentada en esta sección, puede modificarse la ganancia en función de la amplitud de las señales (error, derivada o punto de consigna), dando lugar a PIDs no lineales o a soluciones del tipo planificación de ganancia (Albertos y Sala, 2004).

Hay que hacer notar en este punto que el controlador desarrollado se podría haber modificado incluyendo una tercera variable (la referencia) en la base de reglas, dado que el mismo *error* puede requerir el tratamiento distinto en distintos puntos de funcionamiento, como se sugiere en (Albertos y Sala, 2004).

Δe	e						
	-L	-M	-S	Z	+S	+M	+L
-L	-EL	-EL	-L	-M	-S	+L	+EL
-M	-EL	-L	-M	-S	Z	+M	+EL
-S	-L	-M	-S	-ES	+ES	+M	+L
Z	-M	-S	-ES	Z	+ES	+S	+M
+S	-L	-M	-ES	+ES	+S	+M	+L
+M	-EL	-L	Z	+S	+M	+L	+EL
+L	-EL	-L	+S	+M	+L	+EL	+EL

Tabla I. Memoria asociativa borrosa

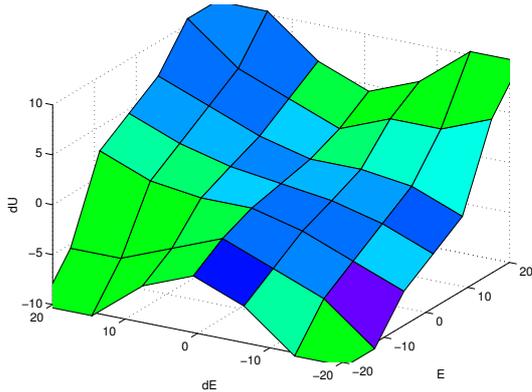


Figura 7. Superficie del controlador borroso

Las reglas son de la forma:

SI **error** es **positivo grande** Y el **cambio en el error** es **negativo pequeño** ENTONCES hacer el **cambio de señal de control** **positivo grande**.

Este tipo de reglas hace que para un punto concreto se disparen cuatro reglas con un cierto grado de pertenencia, por lo que la combinación de las cuatro reglas da la señal de control Δu , que se calcula utilizando el método de reducción a real de Tsukamoto,

$$\Delta u = \frac{\sum_{i=1}^4 (\mu_{\Delta u_i} \cdot \Delta u_i)}{\sum_{i=1}^4 \mu_{\Delta u_i}} \quad (19)$$

como en este caso $\sum_{i=1}^4 \mu_{\Delta u_i} = 1$, tenemos,

$$\Delta u = \sum_{i=1}^4 (\mu_{\Delta u_i} \cdot \Delta u_i)$$

Puede utilizarse una tabla bidimensional de la forma de la Tabla I. La superficie del controlador obtenida puede verse en la figura 7.

La misma idea se ha utilizado en la aplicación de controladores tipo PID borrosos, donde en vez de obtener directamente la superficie de control no-lineal se modifican los parámetros del controlador en función de reglas borrosas. Ejemplos de aplicación de todas estas técnicas, basados en el trabajo seminal (Rubio *et al.*, 1995), se pueden

encontrar en (Luk *et al.*, 1997; Berenguel *et al.*, 1997; Gordillo *et al.*, 1997; Camacho *et al.*, 1997a; Berenguel *et al.*, 1999 y Flores *et al.*, 2005).

Destacan en este ámbito los trabajos basados en la aproximación usando ecuaciones lingüísticas de Juuso y colaboradores (Juuso *et al.*, 1997; Juuso *et al.*, 1998a,b; Juuso, 1999; Oksanen y Juuso, 1999), donde las reglas borrosas se reemplazan por ecuaciones lingüísticas, que proporcionan una base para el diseño de sistemas no-lineales.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES REPRESENTATIVOS DE LOS ESQUEMAS BÁSICOS DE CONTROL

Las estructuras de control mencionadas anteriormente han sido probadas en el campo ACUREX de la Plataforma Solar de Almería, demostrando que los controladores pueden operar en presencia de cambios en la dinámica del proceso causados por cambios en las condiciones de operación.

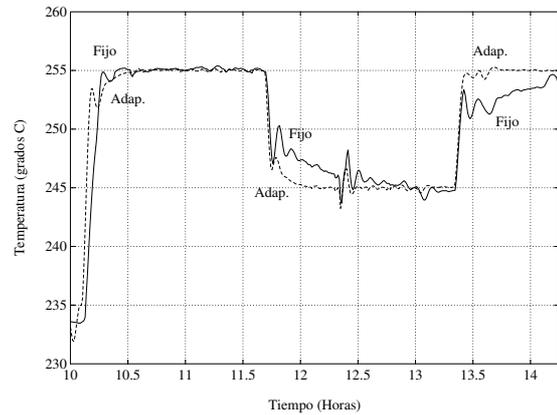


Figura 8. Respuesta con regulador PI de parámetros constantes. Temperatura de salida

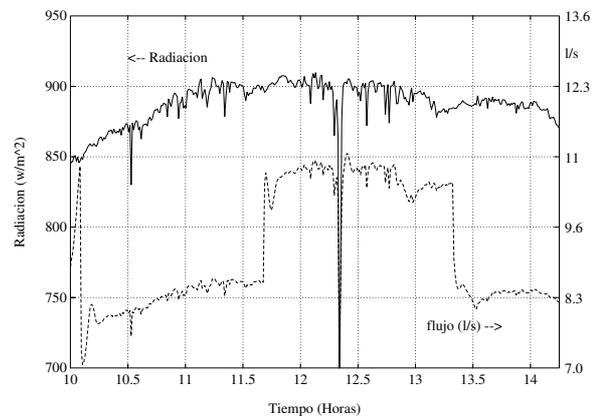


Figura 9. Respuesta con regulador PI de parámetros constantes. Irradiancia y caudal.

Como se ha mencionado anteriormente, el campo de colectores distribuidos puede ser utilizado para diferentes propósitos, en diferentes modos de

operación y con condiciones de trabajo variables (diferentes valores de radiación solar, temperatura de entrada de aceite, temperatura de referencia, etc.). Todos estos factores tienen, de esta forma, que ser tenidos en cuenta para evaluar las capacidades de las posibles estrategias de control.

Como se ha inferido anteriormente, las características dinámicas del proceso varían significativamente a lo largo del rango de operación, lo cual hace difícil obtener un buen control con un regulador PI fijo. Esto puede verse en la figura 8 donde la actuación es buena con caudales en torno a 8 l/s aproximadamente (figura 9), pero con mayores niveles de caudal (11 l/s) la respuesta es más oscilante y tiene mayor tiempo de establecimiento.

Las figuras 10, 11 y 12 muestran resultados del proceso utilizando el controlador PI autoajustable con incorporación del controlador en adelante en serie. Los resultados son significativos ya que se muestra la actuación durante unas 3 horas de operación cuando el nivel de irradiancia está cambiando sustancialmente, debido a la presencia de nubes dispersas.

Las perturbaciones inyectadas son en la forma de cambios en escalones en la temperatura de referencia. Esto genera información dinámica para la estimación; así mismo el resultado en la respuesta de la temperatura de salida sirve para demostrar la calidad de la actuación del sistema de control.

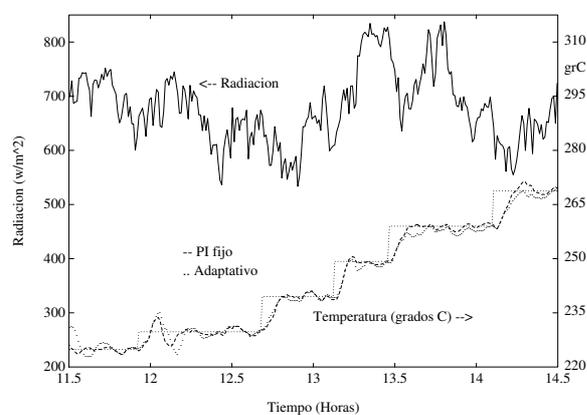


Figura 10. Salida con control PI adaptativo

El período desde las 11:39 a las 12:46 corresponde a la fase de puesta en marcha del proceso, cuando el aceite está recirculando, y el controlador está en período de autoajuste. Después de este período, se obtiene un buen seguimiento a la respuesta en escalón, permaneciendo la temperatura de referencia muy próxima a la señal de referencia, a pesar de los cambios significativos en el nivel de irradiancia de esta experiencia. Esto último demuestra los efectos beneficiosos del controlador por adelante en serie, el cual no solo sirve para reducir las variaciones no esperadas en la tempe-

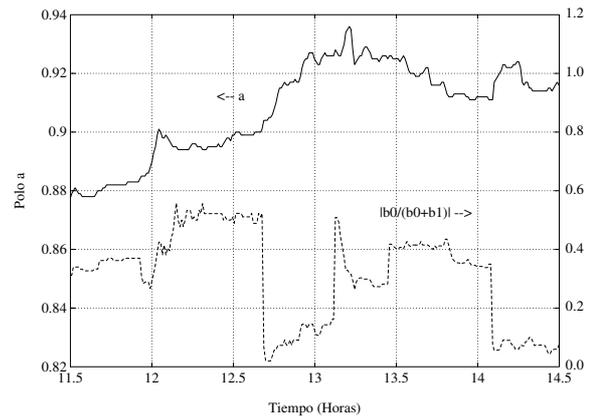


Figura 11. Evolución de los parámetros identificados

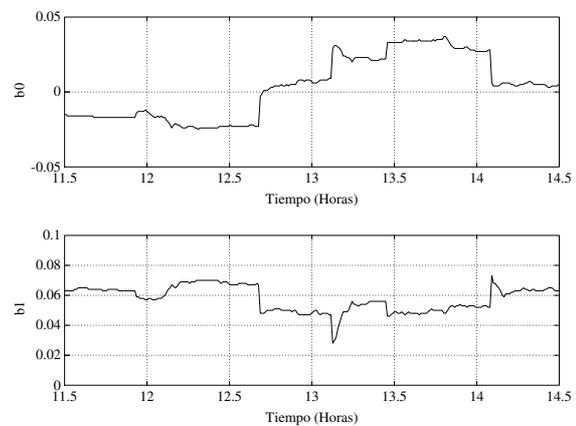


Figura 12. Evolución de los parámetros identificados

ratura de salida sino que también reduce las desviaciones erróneas en los parámetros estimados.

Esto puede verse en la respuesta de los parámetros estimados de la figura 11 en la que el parámetro estimado (a), muestra cambios suaves durante el período del experimento. Éste sigue las variaciones esperadas necesarias para igualar los cambios en la respuesta característica del sistema. Los niveles de irradiancia y la temperatura de salida requerida determinan el flujo de aceite necesario, el cual a su vez determina la velocidad de la respuesta del sistema y el tiempo de retardo.

Mediante los tests de control realizados en la planta, es difícil demostrar las ventajas relativas de un controlador con respecto a otro. Ello es debido a que las condiciones exactas de nivel de irradiancia y de temperatura de entrada nunca pueden reproducirse. Sin embargo, en orden a dar una indicación de la mejora producida por el esquema de control PI adaptativo autoajustable sobre un controlador fijo tipo PI, las condiciones de irradiancia para el test correspondiente a la figura 9 (para un controlador fijo PI), son aplicadas en un estudio de simulación al controlador autoajustable. La respuesta de la temperatura de

salida para el caso adaptativo se superpone como se muestra en la figura 8.

Puede verse que el regulador de parámetros fijo PI trabaja bien para las condiciones correspondientes al primer escalón, pero para los otros escalones, donde el nivel de irradiación es mayor, el comportamiento se deteriora. El controlador autoajutable por otro lado, una vez que los parámetros se han ajustado, proporciona un comportamiento mejor el cual se mantiene a pesar de los cambios en las condiciones de operación.

También, para las condiciones del experimento de la figura 10, las condiciones de irradiancia se han aplicado al modelo de simulación incorporando el controlador de parámetros fijos PI. Otra vez puede verse que el controlador fijo PI, el cual está ajustado para las condiciones de flujo medio, tiende a oscilar cuando el nivel de flujo es bajo, caso que se produce al final del test cuando la temperatura de referencia es alta ($270\text{ }^{\circ}\text{C}$) coincidiendo con nivel bajo de irradiancia (alrededor de 600 W/m^2). El esquema de control adaptativo autoajutable funciona mucho mejor que el controlador fijo, ante los cambios en la característica dinámica de la planta, que corresponden a un día de operación con variaciones grandes del nivel de irradiancia.

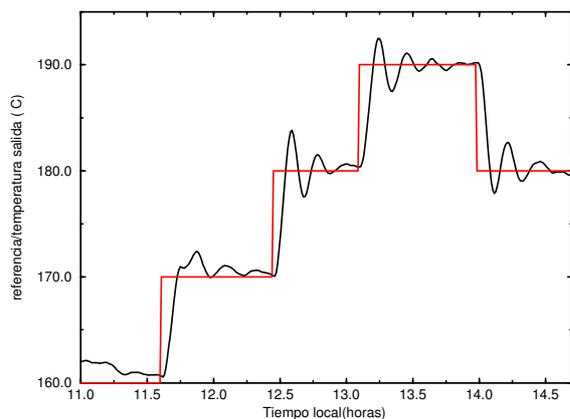


Figura 13. GPC Adaptativo: Temperatura de salida del aceite

La figura 13 muestra la temperatura de salida del aceite y la referencia cuando se aplica el GPC adaptativo. El valor de λ escogido fue 5, y, como se aprecia se obtiene una respuesta muy rápida ante cambios en la referencia (tiempo de subida del orden de 7 minutos). Para tener menor sobreoscilación el factor de ponderación debe aumentarse. La evolución de la radiación en esta prueba se puede comprobar en la figura 14. Corresponde a un día con pequeñas nubes. El caudal de aceite, cambió desde 4.5 l/s a 7 l/s , y el controlador pudo mantener un buen comportamiento ante cambios en la dinámica del proceso.

Como ejemplo ilustrativo del comportamiento del controlador borroso, la figura 15 muestra un ensa-

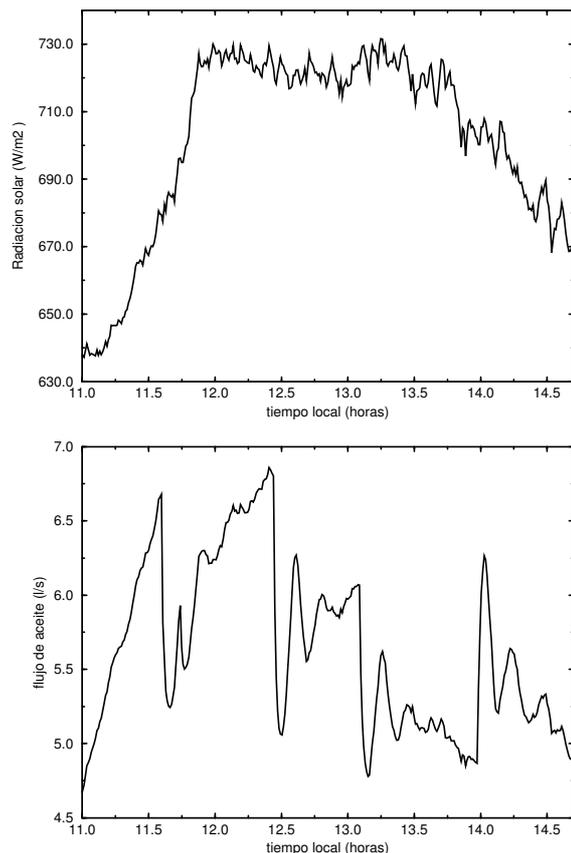


Figura 14. GPC Adaptativo: Radiación solar y caudal de aceite

yo donde como se puede comprobar, se obtienen muy buenos resultados en todos los puntos de operación, teniendo en cuenta que existen fuertes perturbaciones por nubes que producen cambios en la radiación solar (saltos de 200 W/m^2) y por cambios en la temperatura del aceite de entrada (incrementos de $45\text{ }^{\circ}\text{C}$).

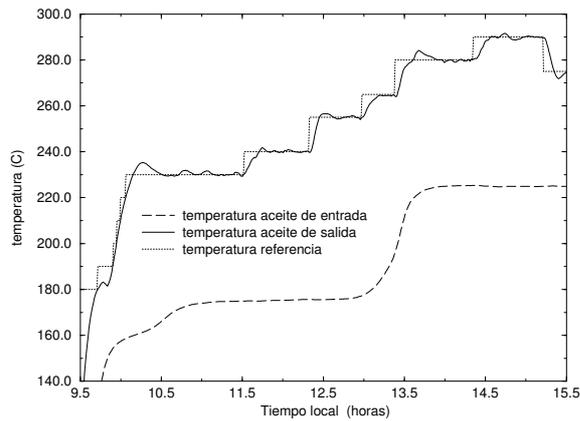
Debido al hecho de que las condiciones de un ensayo no se pueden reproducir de forma exacta, para comparar el comportamiento de algunos de los esquemas de control propuestos, se utilizaron los datos de un día de operación con un controlador PI fijo para simular el comportamiento de los esquemas de control.

La figura 16 muestra los resultados obtenidos aplicando el controlador PI fijo al proceso y los resultados obtenidos aplicando los dos controladores adaptativos PID y el GPC. El PI fijo funciona bien para las condiciones en las que fue diseñado, pero no muy bien fuera de ellas.

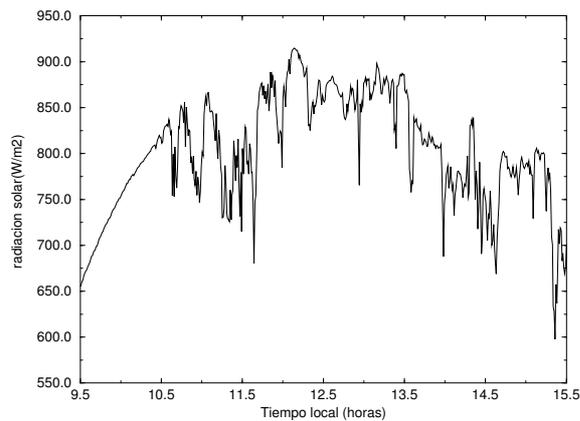
5.1 Otras estrategias de modelado y control

5.1.1. Modelos de caja negra.

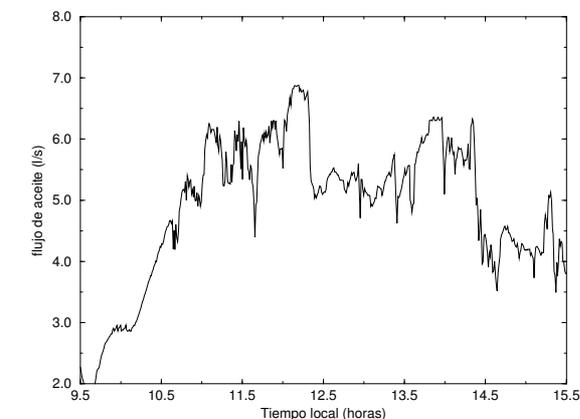
En las secciones previas se han resumido algunos modelos obtenidos tanto para simulación como para control. Dichos modelos se han obtenido de balances básicos



Referencia, salida y temperatura de entrada del aceite



Radiación solar



Flujo de aceite (l/s)

Figura 15. Resultados utilizando controlador borroso el 21 Diciembre 1994

de masa, energía y momento o bien a partir de ensayos realizados en la planta en forma de curva de reacción. Como se ha indicado, los modelos de bajo orden se han utilizado fundamentalmente en el ámbito de sistemas de control adaptativo (Camacho *et al.*, 1992; Camacho *et al.*, 1994a; Camacho y Berenguel, 1997, Normey *et al.*, 1998; Pérez de la Parte *et al.*, 2006), mientras que se han utilizado modelos de alto orden en controladores con ajuste por tabla de ganancias que de esta forma tienen en cuenta las características resonantes del campo solar (Camacho y Berenguel,

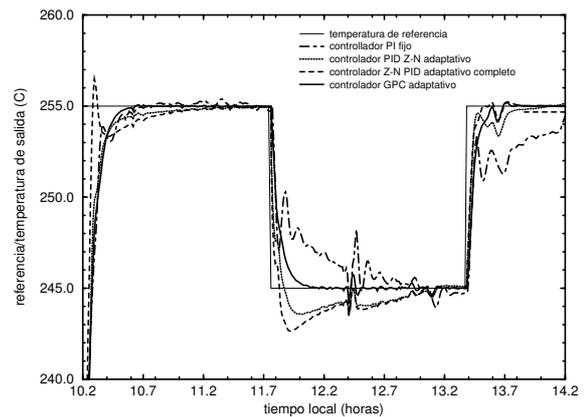


Figura 16. PI fijo, PID adaptativo y GPC adaptativo

1994a; Camacho *et al.*, 1994b; Camacho y Berenguel, 1994a,b; Camacho *et al.*, 1997b; Meaburn y Hugues, 1994; Pickhardt, 1998; Rato *et al.*, 1997b; Nenciari y Mosca, 1998, Johansen *et al.*, 2000; Pickhardt, 2000b).

En el ámbito del modelado no-lineal de caja negra, la mayoría de los modelos desarrollados se basan en redes neuronales artificiales. El primer trabajo en este campo se basó en la obtención de un modelo neuronal que permitiera calcular la respuesta libre del proceso para ser utilizado en el ámbito del control GPC (Arahal *et al.*, 1997; Arahal *et al.*, 1998a,b; Berenguel *et al.*, 1998). Tras los resultados obtenidos, han sido numerosas las aplicaciones que hacen uso de esta aproximación para obtener modelos no-lineales de la planta solar (Pereira y Dourado, 2002a,b; Henriques *et al.*, 2002; Sbarciog *et al.*, 2004; Wyns *et al.*, 2004; Ionescu *et al.*, 2004; Sbarciog *et al.*, 2004; Wyns *et al.*, 2004).

5.1.2. Control robusto. Las estrategias de control robusto intentan aplicar principios y métodos que permiten tener en cuenta de forma explícita las discrepancias entre el modelo y el proceso real. Existen muchas técnicas para diseñar el controlador en bucle cerrado con un buen grado de robustez, algunas de ellas son comentadas en (Camacho y otros, 1997), para el caso de la aplicación al control de plantas solares, además de las ya mencionadas de control predictivo en (Camacho y Berenguel, 1997) y (Pérez de la Parte *et al.*, 2006). Una de estas técnicas es el método de control óptimo robusto LQG/LTR (Rubio *et al.*, 1996).

Otras técnicas de control robusto han sido aplicadas a la planta solar de Almería como QFT en (Cirre *et al.*, 2003). La respuesta en frecuencia del proceso ha sido analizada para diferentes puntos de operación utilizando test por simulación sobre el modelo no lineal del campo (Berenguel *et al.*, 1994). De esta forma, en el diseño del controla-

dor QFT se tienen en cuenta explícitamente las incertidumbre del proceso como un término de compensación en adelanto, obteniendo un conjunto de modelos del proceso de forma que se diseña el controlador para todo el conjunto de plantas.

En (Ortega *et al.*, 1997), se diseña un controlador basado en la teoría de control H_∞ que ha sido probado con éxito en la planta solar. El enfoque utilizado en este caso tiene la ventaja de asegurar un margen de estabilidad grande en la forma de una norma de las perturbaciones y utiliza al igual que otros controladores presentados un controlador por adelanto en serie con el proceso.

5.1.3. Control no-lineal. Siguiendo las aproximaciones de control predictivo y control borroso o neuronal tratadas en secciones anteriores, se han desarrollado esquemas de control predictivo no-lineal (Camacho y Berenguel, 1994b; Arahal *et al.*, 1997; Arahal *et al.*, 1998a,b; Berenguel *et al.*, 1997b; Pickhardt y Silva, 1998; Berenguel *et al.*, 1998; Silva, 1999c; Pickhardt, 2000a; Silva *et al.*, 2003a; Jalili y Besharati, 2003; Gil *et al.*, 2002a,b).

Otros esquemas de control no-lineal que están teniendo mucho éxito en su aplicación a la planta solar son los basados en técnicas de linealización por realimentación, que explotan explícitamente la estructura bilineal de las ecuaciones que describen la dinámica del sistema, donde aparecen productos de la variable de control y las perturbaciones por la temperatura de salida del proceso. Se han desarrollado por tanto diversos esquemas de control basados en esta idea entre los que destacan (Barao, 2000; Barao *et al.*, 2002; Johansen y Storaas, 2002; Silva *et al.*, 2003b; Igreja *et al.*, 2003; Cirre *et al.*, 2005; Henriques *et al.*, 2002).

5.1.4. Otras actividades. La detección temprana de fallos (malfunciones del sistema), combinada con estrategias de control tolerante a fallos es otro de los campos que recientemente han recibido la atención de los investigadores que trabajan en el control de plantas solares. En (Gil *et al.*, 2003) se analizó el comportamiento de controladores predictivos basados en modelo en presencia de fallos en el actuador, sensores y parámetros del sistema. Los trabajos subsiguientes (Cardoso *et al.*, 2003; Cardoso *et al.*, 2004) incorporan un módulo de diagnóstico de fallos y un sistema supervisor para detectar, identificar y acomodar este tipo de fallos.

También se están desarrollando trabajos en el ámbito de la aplicación de técnicas de monitorización y minería de datos para proporcionar herramientas software que faciliten la operación y explotación de datos y la predicción de futuros fallos en el sistema (Maciejewski *et al.*, 2004).

CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado las principales características de diferentes aproximaciones de modelado y control utilizadas en el control de plantas termosolares con colectores distribuidos. Este tipo de plantas se pueden describir mediante modelos de parámetros distribuidos procedentes de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, que permiten estudiar el efecto que la variable manipulable (caudal demandado a la bomba que impulsa el fluido caloportador) y las perturbaciones (principalmente radiación solar, temperatura de entrada del fluido al campo, temperatura ambiente y reflectividad de los espejos colectores) tienen sobre la variable de interés, que es la temperatura de salida del campo solar.

Este modelo de parámetros distribuidos permite estudiar la dinámica del sistema y la obtención de modelos simplificados útiles para control. También permite analizar fenómenos relacionados con la existencia de modos antiresonantes característicos de intercambiadores de calor. En la planta objeto de estudio, dichos modos antiresonantes se excitan bien cuando se exigen respuestas muy rápidas en bucle cerrado (en cuyo caso dichos modos antiresonantes se encuentran en frecuencias dentro del ancho de banda del sistema controlado) o bien cuando existen perturbaciones persistentes en forma de nubes intermitentes que excitan al sistema a altas frecuencias.

Sin embargo, este trabajo se ha centrado en esquemas de control que no tratan explícitamente la existencia de dichos modos antiresonantes, permitiendo por tanto el diseño de sistemas de control utilizando modelos de bajo orden del sistema, consiguiendo respuestas aceptables y una menor complejidad en el diseño. En cualquier caso, se hace referencia también a trabajos que tratan explícitamente de la existencia de dichos modos antiresonantes. Se han explicado estrategias de control que hacen uso implícito o explícito de dichos modelos (fundamentalmente control por adelanto, control PID y control predictivo generalizado) y otras que no hacen uso de modelos, como es el caso del control borroso. También se han comentado las principales características de otras estrategias de control más avanzadas.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha desarrollado gracias a la financiación del Ministerio de Educación y Ciencia, a través de los proyectos CICYT-FEDER DPI2004-07444-C04-04, DPI2004-01804, DPI2004-06419 y por la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía. En el artículo se resumen diversos esquemas de con-

trol que se han desarrollado en colaboración con otros colegas del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla, fundamentalmente Carlos Bordóns, Francisco Gordillo, Manuel R. Arahál, Manuel G. Ortega, Julio Normey y Mercedes Pérez de la Parte.

Este trabajo se ha realizado también en el ámbito de los proyectos de la Unión Europea "Enhancement and Development of Industrial Applications of Solar Energy Technologies", dentro del programa "Human Capital and Mobility - Large Installations Program", EC-DGS XII Program "Training and Mobility of Researchers - TMR" y EC-DGS XII program "Improving Human Potential - IHP" y promovido por CIEMAT - PSA 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". Los autores quieren agradecer toda la ayuda prestada por el personal de la Plataforma Solar de Almería durante los últimos 25 años, especialmente a Eduardo Zarza, Loreto Valenzuela, Diego Martínez, Cristina Martínez, Luis Yebra y los operadores de la instalación ACUREX.

REFERENCIAS

- Se incluyen en este apartado tanto las referencias citadas en el texto como un listado de trabajos desarrollados por diversos grupos internacionales sobre la temática del artículo, para que el lector interesado pueda acceder fácilmente a ellos.
- Albertos, P. y A. Sala (2004). El control borroso: una metodología integradora. *RIAI: Revista Iberoamericana de Informática y Automática Industrial*, **1**(2), pp. 22-31.
- Arahál, M.R., M. Berenguel y E.F. Camacho (1997). Nonlinear neural model-based predictive control of a solar plant. In *Proc. European Control Conf. ECC'97*. Brussels, Belgium, TH-E I2, paper 264.
- Arahál, M.R., M. Berenguel y E.F. Camacho (1998a). Comparison of RBF algorithms for output temperature prediction of a solar plant. In *Proc. CONTROL'98*, Coimbra, Portugal, 9-11 September.
- Arahál, M.R., M. Berenguel y E.F. Camacho (1998b). Neural identification applied to predictive control of a solar plant. *Control Engineering Practice*, **6**, pp. 333-344.
- Aström, K.J. y B. Wittenmark (1989). *Adaptive Control*. Addison-Wesley.
- Barão, M. (2000). *Dynamics and nonlinear control of a solar collector field*. PhD. Thesis (in Portuguese). Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.
- Barão, M., J.M. Lemos y R.N. Silva (2002). Reduced complexity adaptive nonlinear control of a distributed collector solar field. *J. of Process Control*, **12**(1), pp. 131-141.
- Berenguel, M., E.F. Camacho y F.R. Rubio (1994). *Simulation software package for the Acurex field*. Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, ESII Sevilla, Spain, Internal Report. www.esi2.us.es/rubio/libro2.html
- Berenguel, M. (1996). *Contribuciones al control de colectores solares*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, España.
- Berenguel, M. y E.F. Camacho (1996). Frequency-based adaptive control of systems with anti-resonance modes. *Control Engineering Practice*, **4**(5), pp. 677-684.
- Berenguel, M., E.F. Camacho, F.R. Rubio y P. Balsa (1996). Gain scheduling generalized predictive controller applied to the control of a parabolic trough solar collectors field. In *Proc. of the 8th Int. Symp. on Solar Thermal Concentrating Technologies*, Köln, Germany, **2**, pp. 685-703.
- Berenguel, M., E.F. Camacho, F.R. Rubio y P.C.K. Luk (1997). Incremental fuzzy PI control of a solar power plant. *IEEE Proc. - Control Theory and Applications (Part D)*, **144**(6), pp. 596-604.
- Berenguel, M., M.R. Arahál y E.F. Camacho (1998). Modeling free response of a solar plant for predictive control. *Control Engineering Practice*, **6**, pp. 1257-1266.
- Berenguel, M., F.R. Rubio, E.F. Camacho y F. Gordillo (1999). Techniques and Applications of Fuzzy Logic Control of Solar Power Plants. In Leondes, C.T. (Ed.), *Fuzzy Theory Systems Techniques and Applications*, **2**(25). Academic Press.
- Bierman, G. (1977) *Factorization Methods for Discrete Estimation*. New York: Academic Press.
- Camacho, E.F., F.R. Rubio y J.A. Gutierrez (1988). Modelling and Simulation of a Solar Power Plant with a Distributed Collector System. *Int. IFAC Symp. on Power Systems Modelling and Control Applications*. Brussels.
- Camacho, E.F., F.R. Rubio y F.M. Hugues (1992). Self-tuning Control of a Solar Power Plant with a Distributed Collector Field. *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 72-78.
- Camacho, E.F. y M. Berenguel (1994a). Application of Generalized Predictive Control to a Solar Power Plant. In Clarke, D.W. (Ed.). *Advances in Model-Based Predictive Control*. Oxford University Press.
- Camacho, E.F. y M. Berenguel (1994b). Application of generalized predictive control to a solar power plant. *The Third IEEE Conf. on Control Applications*, **3**, Glasgow, UK, pp. 1657-1662.

- Camacho, E.F., M. Berenguel y C. Bordóns (1994a). Adaptive Generalized Predictive Control of a Distributed Collector Field. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, **2**(4), pp. 462-467.
- Camacho, E.F., M. Berenguel y F.R. Rubio (1994b). Application of a gain scheduling generalized predictive controller to a solar power plant. *Control Engineering Practice*, **2**(2), pp. 227-238.
- Camacho, E.F. y C. Bordóns (1995) *Model Predictive Control in the Process Industry*. Springer-Verlag.
- Camacho, E.F. y C. Bordóns (2004). Control Predictivo: Pasado, Presente y Futuro. RIAI: *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, **1-3**.
- Camacho, E.F. y M. Berenguel (1997). Robust adaptive model predictive control of a solar plant with bounded uncertainties. *Int. J. of Adaptive Control and Signal Processing*, **11**(4), pp. 311-325.
- Camacho, E.F., F.R. Rubio y M. Berenguel (1997a). Application of Fuzzy Logic Control to a Solar Power Plant. In Mielczarski, W. (Ed.). *Fuzzy Logic Techniques in Power Systems* series Studies in Fuzziness and Soft Computing. Physica Verlag.
- Camacho, E.F., M. Berenguel y F.R. Rubio (1997b). *Advanced Control of Solar Plants*. Springer, London.
- Camacho, E.F. y C. Bordóns (2004). *Model Based Predictive Control*. Springer.
- Cardoso, A.L., J. Henriques, A. Dourado (1999). Fuzzy supervisor and feedforward control of a solar power plant using accessible disturbances. *European Control Conference ECC99*, Karlsruhe, Germany.
- Cardoso, A., P. Gil, J. Henriques, H. Duarte-Ramos y A. Dourado (2003). A robust fault tolerant model-based control framework: Application to a solar power plant. *IASTED-ISC*, Salzburg, Austria.
- Cardoso, A., P. Gil, J. Henriques, P. Carvalho, H. Duarte-Ramos y A. Dourado (2004). Experiments with a fault tolerant adaptive controller on a solar power plant. *CONTROL04, 6th Portuguese Conf. on Automatic Control*, Faro, Portugal.
- Carmona, R., 1985. *Análisis, modelado y control de un campo de colectores solares distribuidos con un sistema de seguimiento en un eje*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla, España.
- Carotenuto, L., M. La Cava y G. Raiconi (1985). Regular design for the bilinear distributed parameter of a solar power plant. *Int. J. Systems Science*, **16**, pp. 885-900.
- Carotenuto, L., M. La Cava, P. Muraca y G. Raiconi (1986). Feedforward control for the distributed parameter model of a solar power plant. *Large Scale Systems*, **11**, pp. 233-241.
- Cirre, C.M., J.C. Moreno, M. Berenguel (2003). Robust QFT control of a solar collectors field. In Martínez, D. (Ed.), *IHP Programme. Research results at PSA within the year 2002 access campaign*. CIEMAT.
- Cirre, C.M., L. Valenzuela, M. Berenguel y E.F. Camacho (2004). Control de plantas solares con generación automática de consignas. RIAI: *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, **1**, pp. 56-66.
- Cirre, C.M., L. Valenzuela, M. Berenguel, E.F. Camacho (2005). Feedback linearization control for a distributed solar collector field. *16th IFAC World Congress*, Prague.
- Coito, F., J.M. Lemos, L.M. Rato y R.N. Silva (1996). Experiments in predictive control of a distributed collectors solar field. In *Proc. of the Portuguese Automatic Control Conference Control 96*, Porto, Portugal.
- Coito, F., J.M. Lemos, R.N. Silva y E. Mosca (1997). Adaptive control of a solar energy plant: exploiting acceptable disturbances. *Int. J. of Adaptive Control and Signal Processing*, **11**(4), pp. 327-342.
- Eck, M., E. Zarza, M. Eickhoff, J. Rheiländer y L. Valenzuela (2003). Applied research concerning the direct steam generation in parabolic troughs. *Solar Energy*, **74**, pp. 341-351.
- España, M.D. y V.L. Rodríguez (1987). Approximate steady-state modeling of a solar trough collector. *Solar Energy*, **37**(6), pp. 447-545.
- Farkas, I. y I. Vajk (2002a). Internal model-based controller for a solar plant. In *Proc. of the 15th IFAC World Congress*, Barcelona, Spain.
- Farkas, I. y I. Vajk (2002b). Modeling and control of a distributed solar collector field. In *Proc. of the Energy and Environment Congress*, Opatija, Croatia.
- Fortescue, T.R., L.S. Kershenbaum y B.E. Ydstie (1981). Implementation of Self-tuning regulators with variable forgetting factors, *Automatica*, **17**(6), pp. 831-835.
- Flores, A., D. Saez, J. Araya, M. Berenguel y A. Cipriano (2005). Fuzzy predictive control of a solar power plant. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, **13**(1), pp. 58-68.
- Ghezelayagh, H. y K.Y. Lee (2002). Application of neuro-fuzzy identification in the predictive control of power plant. In *Proc. of the 15th IFAC World Congress*, Barcelona, Spain.
- Gil, P., J. Henriques y A. Dourado (2001). Recurrent neural networks and feedback linearization for a solar power plant control. In *Proc. of EUNIT01*, Tenerife, Spain.
- Gil, P., J. Henriques, A. Cardoso y A. Dourado (2002a). Neural network in scheduling linear controllers with application to a solar power

- plant. In *Proc. of 5th IASTED Int. Conf. on Control and Applications*, Cancun, Mexico.
- Gil, P., J. Henriques, P. Carvalho, H. Duarte-Ramos y A. Dourado (2002b). Adaptive neural model-based predictive controller of a solar power plant. In *Proc. of the IEEE Int. Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'02)*, Honolulu, USA.
- Gil, P., A. Cardoso, J. Henriques, P. Carvalho, H. Duarte-Ramos y A. Dourado (2003). Experiments with an adaptive neural model-based predictive controller applied to a distributed solar collector field: Performance and Fault Tolerance Assessment. In Martínez, D. (Ed.). *IHP Programme. Research Results at PSA within the Year 2002 Access Campaign*. CIEMAT.
- Gordillo, F., F.R. Rubio, E.F. Camacho, M. Berenguel y J.P. Bonilla (1997). Genetic design of a fuzzy logic controller for a solar power plant. In *Proc. of the European Control Conference ECC'97*. Brussels, Belgium, paper 268.
- Greco, C., G. Menga, E. Mosca y G. Zappa (1984). Performance improvements of self-tuning controllers by multistep horizons: the MUSMAR approach. *Automatica*, **20**, pp. 681-699.
- Henriques, J., A. Cardoso, A. Dourado (1999a). Supervision and c-Means clustering of PID controllers for a solar power plant. *Int. J. of Approximate Reasoning*, **22**(1-2), pp. 73-91.
- Henriques, J., A. Cardoso, A. Dourado (1999b). Fuzzy supervisor of PID controllers for the Acurex Field at PSA In Martínez, D. (Ed.), *Proc. of the 2nd users group TMR Programme at PSA*, CIEMAT.
- Henriques, J., P. Gil, A. Dourado (2002). Neural output regulation for a solar power plant. *Proc. of the 15th IFAC World Congress*, Barcelona, Spain.
- Igreja, J.M., J.M. Lemos, M. Barao y R.N. Silva (2003). Adaptive nonlinear control of a distributed collector solar field. *Proc. of the European Control Conference ECC03*, Cambridge, UK.
- Ionescu C., B. Wyns, M. Sbarciog, L. Boullart y R. De Keyser (2004). Comparison between physical modeling and neural network modeling of a solar power plant. In *Proc. of the IASTED Int. Conf. on Applied Simulation and Modeling ASM'04*, Rhodes, Greece, June 28-30.
- Isermann, R. (1981). *Digital Control Systems*. Springer-Verlag.
- Jalili-Kharaajoo, M. y F. Besharati (2003). Intelligent predictive control of a solar power plant with neuro-fuzzy identifier and evolutionary programming optimizer. *Proc. of the IEEE Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation ETFA'03*, **2**, pp. 173-176.
- Jalili-Kharaajoo, M. (2004). Predictive control of a solar power plant with neuro-fuzzy identification and evolutionary programming optimization. R. Monroy et al. (Eds.): *MICAI 2004, LNAI 2972*, pp. 794-803, 2004. Springer, Berlin.
- Johansen, T.A., K.J. Hunt y I. Petersen (2000). Gain-scheduled control of a solar power plant. *Control Engineering Practice*, **8**(9), pp. 1011-1022.
- Johansen, T.A. y C. Storaas (2002). Energy-based control of a distributed solar collector field. *Automatica*, **38**(7), pp. 1191-1199.
- Juuso, E.K., P. Balsa y K. Leiviska (1997). Linguistic equation controller applied to a solar collectors field. *Proc. European Control Conference ECC97*, Brussels, Belgium.
- Juuso, E.K., P. Balsa, L. Valenzuela y K. Leiviská (1998a). Robust intelligent control of a distributed solar collector field. In *Proc. of Control98, the 3rd Portuguese Conference on Automatic Control*, Coimbra, Portugal, **2**, pp. 621 - 626.
- Juuso, E.K., P. Balsa y L. Valenzuela (1998b). Multilevel linguistic equation controller applied to a 1MWh solar power plant. In *Proc. of the 1998 American Control Conference - ACC98*, Philadelphia, USA, **6**, pp. 3891-3895.
- Juuso, E.K. (1999). Fuzzy Control in Process Industry. In Verbruggen, H.B. et al. (Eds.) *Fuzzy Algorithms for Control*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Juuso, E.K. y L. Valenzuela (2003). Adaptive intelligent control of a solar collector field. *3rd European Symp. on Intelligent Technologies, Hybrid Systems and their implementation on Smart Adaptive Systems (EUNITE 2003)*, Oulu, Finland, July 10-12.
- Kalt, A., M. Loosme y H. Dehne (1982). *Distributed Collector System Plant Construction Report*, IEA/SSPS Operating Agent DF-VLR, Cologne.
- Ke, J.Y., K.S. Tang, K.F. Man y P.C.K. Luk (1998). Hierarchical genetic fuzzy controller for a solar power plant. In *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics ISIE-98*, **2**, pp. 584-588. South Africa.
- Kickert M. y R.H. Van Nauta Lemke (1976). Application of a fuzzy controller in warm water plant. *Automatica*, **12**, pp. 301-308.
- King, P.J. and E.H. Mamdani (1975). The application of fuzzy control systems to industrial processes. *IFAC World Congress*, MIT, Boston.
- Klein, A.A., J.A. Duffie y W.A. Beckman (1974). Transient considerations of flat-plate solar collectors. *Trans. of the ASME Journal of Engineering and Power*, **96A**, 109.

- Larsen, M.P. (1981). Industrial application of fuzzy logic control. *Fuzzy reasoning and its applications*. Ed. Mamdani, E.H. and B.R. Gaines. New York: Academic Press. pp. 335-342.
- Larsen, M. (1987). Performance of the Coolidge solar thermal electric power plant. *J. Solar Energy Eng.*, **109**, pp.2-8.
- Lee, C.C. (1990a). Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part I. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, **20**(2), pp. 404-418.
- Lee, C.C. (1990b). Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part II. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, **20**(2), pp. 419-435.
- Lemos, J.M., L.M. Rato y E. Mosca (2000). Integrating predictive and switching control: Basic concepts and an experimental case study, in Allgower F., Zheng, A. (Eds.) *Nonlinear Model Predictive Control*, Basel, Switzerland: BirkhauserVerlag, pp. 181-190.
- Loebis, D. (2000). *Fuzzy Logic Control of a Solar Power Plant*. Masters Dissertation, University of Sheffield, UK.
- Luk, P.C.K., K.K. Khoo y M. Berenguel, M. (1997). Direct fuzzy logic control of a solar power plant using distributed collector fields. In *Proc. of the 2nd Int. ICSC Symp. on Soft Computing and Intelligent Industrial Automation SOCO-97* Nimes, France, pp. 81-89.
- Luk, P.C.K., K.C. Low y A. Sayiah (1999). GA-based fuzzy logic control of a solar power plant using distributed collector fields, *Renewable Energy*, **16**(1-4), pp. 765-768.
- Maciejewski, H., M. Berenguel, L. Valenzuela y C.M. Cirre (2004). Data Mining - applications and perspectives for solar plant control and monitoring. In Martínez D. (Ed.) *The IHP Programme - Research results at PSA within the year 2003 access campaign*. CIEMAT.
- Mamdani, E.H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic plant. *Proc. IEE-Part D*, **121**, pp. 1585-1588.
- Markou H. y L. Petropoulakis (1998). PID-Type Fuzzy control of the Acurex solar collector field. In Martínez D. (Ed.) *Proc. of the 2nd users Workshop. TMR Programme at PSA*, Ed. CIEMAT, pp. 37-42.
- Meaburn, A. y F.M. Hughes (1993a). A control technique for resonance cancellation. In *Proc. of the IEE colloquium on nonlinear control using structural knowledge of system models*, London.
- Meaburn A. y F.M. Hugues (1993b). Resonance characteristics of distributed solar collector fields, *Solar Energy*, **51**(3), pp. 215-221.
- Meaburn A. y F.M. Hughes (1994). Prescheduled adaptive control scheme for resonance cancellation of a distributed solar collector field. *Solar Energy*, **52**(2), pp. 155-166.
- Meaburn, A. y F.M. Hughes (1995). A prescheduled adaptive control scheme based upon system knowledge. In *Proc. of the IEE Colloquium on Adaptive Controllers in Practice - Part One*, pp. 6/1-6/5.
- Meaburn, A. (1995). *Modeling and control of a distributed solar collector field*. PhD Thesis, The Department of Electrical Engineering and Electronics, UMIST, UK.
- Meaburn, A. y F.M. Hughes (1996a). A Simple predictive controller for use on large scale arrays of parabolic trough collectors. *Solar Energy*, **56**(6), pp. 583-595.
- Meaburn, A. y F.M. Hughes, F.M. (1996b). Feed-forward control of solar thermal power plants. *J. Solar Energy Engineering*.
- Nenciari, G. y E. Mosca (1998). Supervised multicontrollers for temperature regulation of a distributed collector field. In Martínez, D. (Ed.), *Proc. of the 1st users group TMR Programme at PSA*, CIEMAT.
- Normey-Rico, J., C. Bordóns, M. Berenguel y E.F. Camacho (1998). A robust adaptive dead-time compensator with application to a solar collector field. In *Proc. of the IFAC Linear Time Delay Systems Workshop*, Grenoble, France, pp. 105-110.
- Oksanen, P. y E.K. Juuso, E.K. (1999). Advanced control for solar systems at PSA, *Proc. of TOOLMET99, Symp. Tool Environments and Development Methods for Intelligent Systems*, Oulu, Finland, pp. 123-134.
- Orbach, A., C. Rorres y R. Fischl (1981). Optimal control of a solar collector loop using a distributed-lumped model. *Automatica*, **27**(3), pp. 535-539.
- Ortega, M.G., F.R. Rubio y M. Berenguel (1997). An H_∞ Controller for a solar power plant. In *Proc. of the IASTED Int. Conf. on Control*. Cancún, México, pp. 122-125.
- Pereira, C. y A. Dourado (2002a). Application of a neuro-fuzzy network with support vector learning to a solar power plant. In *Proc. of the 15th IFAC World Congress*, Barcelona, Spain.
- Pérez de la Parte, M., C.M. Cirre, E.F. Camacho y M. Berenguel (2006). Application of predictive sliding mode controllers to a solar plant. Submitted to *IEEE Trans. on Control Systems Technology*.
- Pickhardt, R. (1998). Application of adaptive controllers to a solar power plant using a multi-model description. In *Proc. of the American Control Conference*, Albuquerque, NM.
- Pickhardt, R. y R.N. Silva, R.N. (1998). Application of a nonlinear predictive controller to a solar power plant. In *Proc. of the 1998 IEEE*

- Int. Conf. on Control Applications*, **1**, pp.6-10, Glasgow, UK.
- Pickhardt, R. (2000a). Nonlinear modeling and adaptive predictive control of a solar power plant, *Control Engineering Practice*, **8**(8), pp. 937-947.
- Pickhardt, R. (2000b). Adaptive control of a solar power plant using a multi-model control. *IEE Proc. Theory and Applications*, **147**(5), pp. 493 -500.
- Pilkington Solar International, 1996. Status report on Solar Thermal Power Plants, Cologne (Germany).
- Rato, L., R.N. Silva, J.M. Lemos y F. Coito (1997a). Multirate MUSMAR cascade control of a distributed solar field. In *Proc. of the European Control Conference ECC97*. Brussels, Belgium.
- Rato, L., D. Borelli, E. Mosca, J.M. Lemos y P. Balsa (1997b). MUSMAR based switching control of a solar collector field. In *Proc. of the European Control Conference ECC97*. Brussels, Belgium.
- Rorres, C., A. Orbach y R. Fischl (1980). Optimal and suboptimal control policies for a solar collector system. *IEEE Trans. Automatic Control*, **25**, pp. 1085-1091.
- Rubio, F.R. (1985). *Control adaptativo de procesos industriales. Aplicación a una planta solar*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, España.
- Rubio, F.R., R. Carmona y E.F. Camacho (1986). Adaptive control of the ACUREX field. In Kesserling, P., Selvage, C.S., *The IEA/SSPS Solar Thermal Power Plants*, **2**, pp. 5.2.1-5.2.18, Springer-Verlag.
- Rubio, F.R., F.M. Hughes y E.F. Camacho (1989). Self-tuning PI control of a solar power plant. Preprints of *IFAC Symp. in Adaptive Systems in Control and Signal Processing*, pp. 335-340, Glasgow, UK.
- Rubio, F.R., M. Berenguel, E.F. Camacho (1995). Fuzzy logic control of a solar power plant. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, **3**(4), pp. 459-468.
- Rubio, F.R., F. Gordillo y M. Berenguel (1996). LQG/LTR control of the distributed collector field of a solar power plant. *13th World Congress of IFAC*, San Francisco, USA, **0**, pp. 133-138.
- Ruiz, V. y C. Gómez. *Centrales Eléctricas Termosolares. Energías Renovables y Medio Ambiente*. Ed. Centro de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid, 1982.
- Sbarciog M., B. Wyns, C. Ionescu, R. De Keyser y L. Boullart (2004). Neural networks models for a solar plant. In *Proc. of 2nd IAS-TEC Conf. on Neural Networks and Computational Intelligence (NCI2004)*, Grindelwald, Switzerland.
- Scharf, E.M., N.J. Mondie y E.H. Mamdani (1983). *A Self-organizing algorithm for the control of a robot arm*. Queen Mary College University of London.
- Scharf, E.M. (1985). Fuzzy logic could redefine robot control. *Robotica*, Feb., pp. 11-13.
- Silva, R.N., L.M. Rato, J.M. Lemos y F. Coito (1997). Cascade control of a distributed collector solar field, *J. of Process Control*, **7**(2), pp. 111-117.
- Silva, R.N., N. Filatov, J.M. Lemos y H. Unbehauen (1998). Feedback/feedforward dual adaptive control of a solar collector field. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Control Applications*, **1**, pp. 309 -313, Glasgow, UK.
- Silva, R.N. (1999a). Dual Predictive Control of Processes with Accessible Disturbances (in Portuguese). PhD Thesis, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.
- Silva, R.N. (1999b). Time scaled predictive controller of a solar power plant. In *Proc. European Control Conference 99*, Karlsruhe, Germany.
- Silva, R.N., L.M. Rato, L.M. Barao y J.M. Lemos (2002a). A physical model based approach to distributed collector solar field control. In *Proc. of the American Control Conference*, Anchorage, AK May 8-19, pp. 3817-1822.
- Silva, R.N., L.M. Rato y J.M. Lemos, J.M. (2002b). Observer based nonuniform sampling predictive controller for a solar plant. In *Proc. of the 15th IFAC world congress*, Barcelona, Spain.
- Silva, R.N., L.M. Rato y J.M. Lemos (2003a). Time scaling internal state predictive control of a solar plant. *Control Engineering Practice*, **11**(12), pp. 1459-1467.
- Silva, R.N., J.M. Lemos y L.M. Rato (2003b). Variable sampling adaptive control of a distributed collector solar field. *IEEE Control Systems Technology*, **11**(5), 2003.
- Stirrup, R., D. Loebis, A.J. Chipperfield, K.S. Tang, S. Kwong, S. y K.F. Man (2001). Gain-scheduled control of a solar power plant using a hierarchical MOGA-tuned fuzzy PI-controller. In *Proc. ISIE 2001, the IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics*, **1**, pp. 25-29.
- Stuetzle T., N. Blair, J.W. Mitchell y A. Beckman (2004). Automatic control of a 30 Mwe SEGS VI parabolic trough plant. *Solar Energy*, **76**, pp. 187-193.
- Sudkamp, T. y R.J. Hammell II (1994). Interpolation, Completion, and Learning Fuzzy Rules. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, **24**(2).
- Valenzuela, L. y P. Balsa (1998). Series and parallel feedforward control schemes to regulate the operation of a solar collector field. In

- Martínez, D. (Ed.), *Proc. of the 2nd users Workshop*. TMR Programme at PSA, CIEMAT, pp. 19-24. Almería (España).
- Valenzuela, L., E. Zarza, M. Berenguel y E.F. Camacho (2003). Control concepts for direct steam generation process in parabolic troughs. In *Proc. ISES Solar World Congress*, Goteborg, Sweden, June 14-19.
- Valenzuela, L., E. Zarza, M. Berenguel, E.F. Camacho (2004). Direct steam generation in solar boilers. *IEEE Control systems magazine*, **24**(2), pp. 15-29.
- Valenzuela, L., E. Zarza, M. Berenguel, E.F. Camacho (2005a). Control concepts for direct steam generation in parabolic troughs. *Solar Energy*, **78**, pp. 301-311.
- Valenzuela, L., E. Zarza, M. Berenguel, E.F. Camacho (2005b). Control schemes for direct steam generation in parabolic solar collectors under recirculation operation mode. *Solar Energy*, **80**, pp. 1-17.
- Vaz, F., R. Oliveira y R.N. Silva (1998). PID control of a solar plant with gain interpolation. In Martínez, D. (Ed.), *Proc. of the 2nd users group TMR Programme at PSA*, CIEMAT.
- Wettermark, G., 1988. Performance of the SS-PS solar power plants at Almería. *J. Solar Energy Eng.*, **110**, 235-246.
- Willigenburg, L.G. van, J. Bontsema, W.L. De Koning, L. Valenzuela y C.M. Cirre (2004a). Direct reduced-order digital control of a solar collector field. In Martínez D. (Ed.). *IHP Programme. Research Results at PSA within the Year 2003 Access Campaign*. CIEMAT.
- Willigenburg, L.G. van, J. Bontsema, W.L. De Koning, L. Valenzuela y C.M. Cirre (2004b). Digital optimal reduced-order control of a solar power plant. In *Proc. of UKACC-IEE CONTROL 2004*, University of Bath, UK.
- Wyns, B., M. Sbarciog, C. Ionescu, L. Boullart y R. De Keyser (2004). Neural network modeling versus physical modeling application to a solar power plant. In Martínez D. (Ed.). *IHP Programme. Research Results at PSA within the Year 2003 Access Campaign*. CIEMAT.
- Yasunobu, S., S. Miyamoto, T. Takaoka y H. Ohshiroa (1984), Application of predictive fuzzy control of automatic train operation controller. *IECON'84*.
- Yebra, L.J., S. Dormido, M. Berenguel y E. Zarza (2001). Modeling and simulation of a parabolic collector field (in Spanish). In *Workshop en Metodologías de Modelado y Simulación de Sistemas*, Barcelona.
- Yebra, L.J., M. Berenguel y S. Dormido (2005). Extended Moving Boundary Models for Two-Phase Flows, *16th IFAC World Congress*, Praha, 2005.
- Yebra, L.J. (2006). Modelado orientado a objetos de colectores cilindroparabólicos usando Modelica. Tesis Doctoral. UNED, Madrid, España.
- Zarza, E. (1991). *Solar Thermal Desalination Project*. First phase results & second phase description. Colección Documentos CIEMAT.
- Zarza, E., L. Valenzuela, J. León, K. Hennecke, M. Eck, H.D. Weyers y M. Eickhoff (2001). The DISS project: Direct steam generation in parabolic troughs. Operation and maintenance experience & Update on project status. In *Proc. of ASME International Solar Energy Conference: Forum 2001*. Washington D.C (USA). 21-25 April.
- Zarza, E., L. Valenzuela, J. León, K. Hennecke, H.D. Weyers y M. Eickhoff (2002a). Direct Steam Generation in Parabolic Troughs. Final Results and Conclusions of the DISS Project. In *Proc. 11th SolarPaces Int. Symp. on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies*. Zurich, Sept. 4-6.
- Zarza, E., L. Valenzuela L., J. León, D.H. Weyers, M. Eickhoff, M. Eck y K. Hennecke (2002b). The DISS project: Direct steam generation in parabolic trough systems. Operation & Maintenance Experience and Update on Project Status. *J. Solar Energy Engineering-Trans. of the ASME*, **124**, pp. 126-133.
- Zarza, E., L. Valenzuela, J. León, K. Hennecke, M. Eck, H.D. Weyers y M. Eickhoff (2004). Direct steam generation in parabolic troughs: Final results and conclusions of the DISS project. *Energy*, **29**, pp. 635-544.