

# ESTRUCTURA DE REGULACIÓN CON GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE CONSIGNAS Y CONTROL POR ADELANTO PARA UN CAMPO DE COLECTORES SOLARES

Cristina Martínez

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

Loreto Valenzuela

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

Manuel Berenguel

Universidad de Almería, Dpto. Lenguajes y Computación, Ctra. Sacramento s/n, 04120, Almería  
[beren@ual.es](mailto:beren@ual.es)

Eduardo F. Camacho

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

## Resumen

*En este artículo se muestran los resultados de operación de un Campo de Colectores Solares del tipo Cilindro Parabólico de forma automática por una estructura de control por adelantado en paralelo con un controlador tipo I-PD con generación automática de consignas. El objetivo de control para este sistema es mantener la temperatura de salida del fluido que circula por las tuberías del campo a un valor establecido, a pesar de las perturbaciones a las que está sometida la planta. Dichas perturbaciones se producen en la temperatura del fluido que entra al campo, procedente de un tanque de almacenamiento térmico, en la temperatura ambiente o en la radiación solar. Esta última constituye la fuente primaria de energía del sistema. Las dificultades para operar la planta son debidas a las perturbaciones citadas anteriormente y que no son manipulables, a las no linealidades y a su dinámica compleja. Para ello se ha diseñado una estructura de control que mantiene la temperatura de salida de los lazos a un nivel que se determina automáticamente mediante un generador de consignas que tiene en cuenta las condiciones en las que se encuentra la planta (radiación, temperatura a la entrada y temperatura ambiente) y ciertos parámetros necesarios para la operación segura de la planta. La variable manipulada es la velocidad a la que una bomba de alimentación envía al campo solar el aceite procedente del tanque de almacenamiento. La energía térmica almacenada se utiliza para producir agua desalinizada o energía eléctrica.*

**Palabras Clave:** Generación automática de consignas, Control por adelantado, 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 (P.S.A.) situada en el desierto de Tabernas (Almería). Dicho campo consta de 480 módulos de colectores. Cada colector está constituido por una superficie parabólica que concentra la radiación solar directa en un tubo situado en la línea focal de la parábola. 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 se envía al campo y retorna al mismo tanque. El retorno del aceite caliente puede hacerse a la parte alta del tanque o a la parte baja 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>. 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. La Figura 1 muestra un diagrama del campo ACUREX.

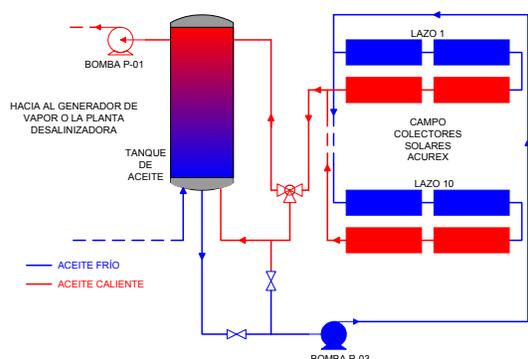


Figura 1: Esquema del campo de colectores solares ACUREX

El artículo se encuentra organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se trata el problema de control de este tipo de plantas y se citan otros algoritmos de control probados en la misma planta. En la sección 3 se describe la estructura de control desarrollada. En la sección 4 se muestran resultados experimentales obtenidos en la planta de colectores con la estructura de control implementada y la sección 5 finaliza con las conclusiones a las que se ha llegado con 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 operar la planta desalinizadora o producir energía eléctrica. 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. Para evitar stress del material de los tubos absorbedores del campo 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 no sea mayor de 70 o 80 °C. Esto añade más complejidad a la operación de la planta ya que es necesario cambiar la consigna dependiendo del punto de operación de la planta (nivel de radiación solar, temperatura, etc) 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 se ha resuelto diseñando un generador automático de consignas que tiene en cuenta las restricciones por seguridad de la planta y su estado de funcionamiento actual. La temperatura de salida es manipulada variando el caudal de aceite enviado por la bomba de impulsión. Esta bomba está diseñada para proporcionar un caudal volumétrico de aceite entre 2 y 12 l/seg., determinando así el rango de operación de la planta. Las no linealidades que caracterizan a la planta aumentan la complejidad del sistema. Dependiendo del rango de operación y de las perturbaciones de la planta, irradiancia ( $Irr$ ), temperatura de entrada ( $T_{in}$ ) y temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), 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. En los últimos 10 años se han probado distintas clases de algoritmos de control en la planta [4],[5],[8],[9]. Esta fase de la operación ha supuesto un problema para muchos. En la mayoría de los casos se procedía 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 *et al* (2003) han obtenido buenos resultados en esta fase utilizando temperaturas de referencia adaptadas al punto de operación. 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 energía del sistema ni garantizar una operación segura del sistema, sino evaluar la respuesta de los controladores ante escalones en la temperatura de referencia, realizados de forma manual. La temperatura de referencia era establecida teniendo en cuenta las condiciones actuales de la planta.

## 3 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE CONTROL

La estructura de control diseñada se puede ver en la Figura 2. 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 la consigna de temperatura de salida,  $T_{ref}$ , adecuada teniendo en cuenta el estado actual de la planta ( $Irr$ ,  $T_{in}$ ,  $T_{amb}$ , densidad del aceite  $\rho$  y  $\Delta T = (T_{out} - T_{in})$ ) 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 la  $T_{ref}$ . 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 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.

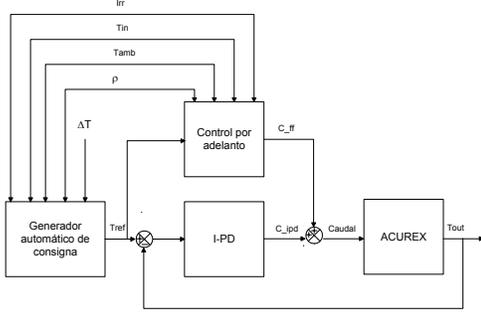


Figura 2: Esquema de control de la planta ACUREX

### 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 cantidad de energía 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/seg. La dinámica de la planta es más complicada cuando se trabaja a muy bajo caudal, en torno a 2 l/seg, debido a que el tiempo de residencia del fluido en el campo solar es mayor, la constante de tiempo del sistema es por tanto más alta y es posible excitar los modos resonantes que se han demostrado pueden aparecer en este sistema [6]. Este elemento proporciona 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. 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 los valores de  $T_{in}$  en cada instante y por tanto las variaciones de  $T_{in}$  debido a la existencia de aceite frío residente en las tuberías y que es recirculado a la entrada del campo sin pasar por el tanque de almacenamiento. Basándonos en una ecuación de balance de energía (1) y en los estudios realizados por Camacho *et al.* [2],[3], 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  $\Delta T$ . En (1)  $Q_{in}$  es la energía que entra en el sistema en W (2) y  $Q_{loss}$  es la energía que se pierde (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  $\Delta h$  la diferencia de entalpía entre la salida y la entrada del campo solar (J/kg/s). La entalpía específica del aceite se puede calcular (4) a partir del calor específico del aceite  $c_p$  con la ecuación (5), siendo  $T$  temperatura en grados Celsius.

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

$$Q_{in} = \eta \cdot \sigma \cdot A_{cor} \cdot Irr_{cor} \quad (2)$$

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

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

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

La energía que entra en el sistema  $Q_{in}$  depende de la eficiencia óptica pico de los colectores ACUREX ( $\eta$ ), de la reflectividad de los espejos ( $\sigma$ ), de la superficie efectiva reflectante ( $A_{cor}$ ) y de la irradiancia efectiva ( $Irr_{cor}$ ) en la superficie del colector. 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 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 0.013 y 0.006133 respectivamente.

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

$$\rho = 903.16 - 0.672 \cdot T_m \quad (kg/m^3) \quad (7)$$

Teniendo en cuenta la función (7) para calcular la densidad del aceite en función de su temperatura, y 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  $T_{out}$ , indicando de esta forma el próximo valor de salida a obtener.

$$A = 3.7645 \times 10^{-3} + \frac{Coef1}{2 \cdot \dot{m}} \quad (8)$$

$$B = 1.819 + (T_m \cdot \frac{Coef1}{2 \cdot \dot{m}}) - (T_{amb} \cdot \frac{Coef1}{2}) - \frac{Coef2}{\dot{m}} \quad (9)$$

$$C = \frac{N A Irr_{cor} + (Coef1 \cdot T_{in} - Coef2) \cdot T_{amb}}{\dot{m}} - (3.7645 \cdot 10^{-3} + \frac{Coef1}{2}) \cdot T_{in}^2 - (1.819 + ((T_m - T_{amb}) \cdot \frac{Coef1}{2} - Coef2)) \cdot T_m \quad (10)$$

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

Las expresiones (8), (9), (10) se corresponden con los coeficientes de la ecuación (11). Resolviendo esta ecuación se obtiene el nuevo valor de temperatura de referencia.

### 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  $\eta$  y  $\sigma$  pueden considerarse constantes puesto que no varían significativamente a lo largo del día.

El caudal de aceite que calcula el controlador por adelanto se muestra en la ecuación (12).

$$C_{\_ff} = \eta \cdot \sigma \cdot \frac{A_{cor} \cdot Irr_{cor}}{\Delta h \cdot \rho(T) \cdot 10^{-3}} - H_1 \cdot \frac{(T_{ref} - T_{amb})}{\Delta h \cdot \rho(T) \cdot 10^{-3}} \quad (l/seg) \quad (12)$$

### 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 temperatura de salida de los lazos ( $T_{out}$ ), la función de control por adelanto no es capaz de corregir el error, si lo hubiera, entre la consigna y  $T_{out}$  en régimen permanente. Para eliminar ese error de régimen permanente se ha añadido una estructura I-PD en paralelo con controlador por adelanto. Los parámetros de la estructura de control son:

$$\begin{aligned} K_p &= -0.2 \text{ }^\circ\text{C/l/seg} \\ T_i &= 200 \text{ seg} \\ T_d &= 40 \text{ seg} \end{aligned}$$

Los parámetros del I-PD [7] han sido calculados mediante las reglas heurísticas de Ziegler-Nichols para un punto nominal de operación y ajustados posteriormente en la propia planta. La señal manipulada se obtiene mediante (13).

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

La diferencia entre un I-PD y un PID clásico es que en el último, la parte proporcional, derivativa e integral se encuentran en la trayectoria directa, mientras que en el I-PD, solo la parte integral se encuentra en la trayectoria directa. La parte proporcional y derivativa se encuentran en la trayectoria de realimentación. De esta forma se obtienen mejores resultados cuando se realizan

cambios de consigna bruscos o en cortos periodos de tiempo.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se han llevado a cabo varios ensayos en la planta ACUREX de la P.S.A. con la estructura de control mostrada en la Figura 2. Los resultados obtenidos se muestran en esta sección. Hemos 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.

### 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.

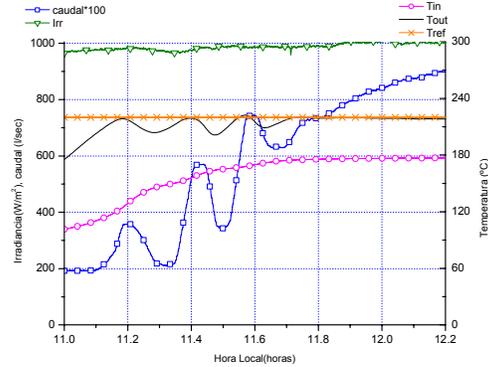


Figura 3: Detalle de la fase de arranque de un ensayo llevado a cabo el 19-Julio-2001

La Figura 3 muestra la fase de arranque de un ensayo realizado en la planta utilizando un controlador basado en lógica difusa [9]. Tal y como se puede observar, la temperatura de entrada inicial sufre variaciones debido a la mezcla con el aceite frío procedente del campo y que se devuelve al campo solar de nuevo sin pasar por el tanque de almacenamiento. 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.

La Figura 4 muestra un arranque utilizando la estructura de control diseñada en este trabajo (ver Figura 2). El generador de consignas calcula una

temperatura de referencia teniendo en cuenta la radiación, la temperatura de entrada, etc. Se puede apreciar como varía a la vez que se incrementa la temperatura de entrada. La estructura de control realiza el seguimiento de la consigna en todo momento. La fase de arranque es más lenta debido a que la radiación solar era muy baja, lo que obligó a la estructura de control a trabajar en bajo caudal, aumentando el retardo de la respuesta de la planta.

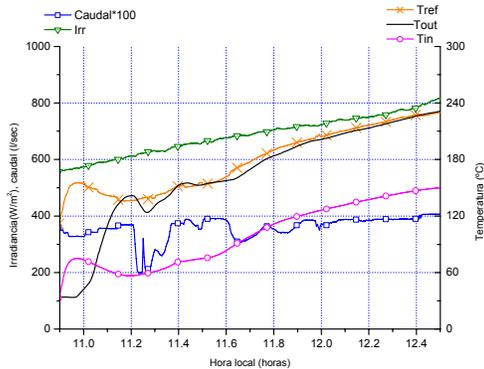


Figura 4: Detalle de la fase de arranque de un ensayo cancelando temporalmente el I-PD llevado a cabo el 1-Julio-2003

#### 4.2 RESPUESTA ANTE PERTURBACIONES

La Figura 5 muestra un ensayo en el que la variación de la radiación solar es muy acentuada debido a la aparición de nubes. Se puede observar cómo la temperatura de referencia se modifica en función de la radiación disponible en cada instante de muestreo.

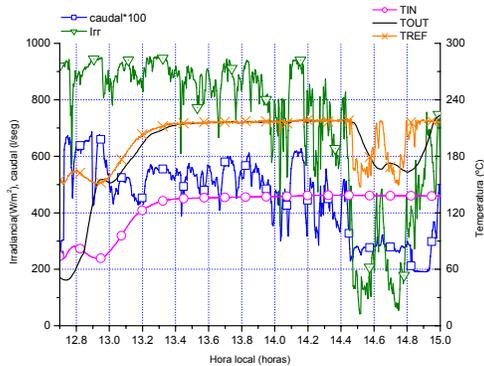


Figura 5: Detalle de fase de ensayo con perturbaciones de radiación. Fecha 26-Junio-2003

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.

La Figura 6 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.

## 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 era utilizar esta estructura de control automático para calentar el aceite de un Campo de Colectores Solares a la máxima temperatura posible según las condiciones de la planta y a su vez minimizar el esfuerzo de control.

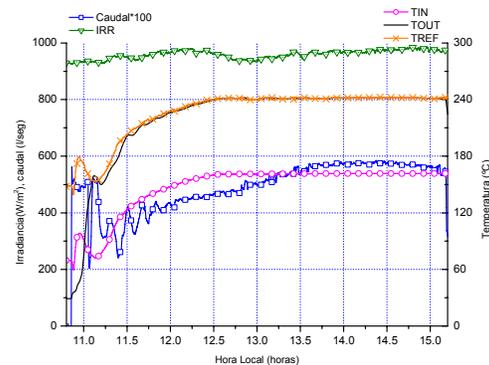


Figura 6: Ensayo completo realizado el día 27-Junio-2003.

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 irradiancia. 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. Finalmente, se han comentado los resultados experimentales obtenidos en la planta.

#### Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el ámbito 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**

- [1] Beckman, D. Solar Engineering of Thermal Processes. A Wiley-Interscience publication, 1991.
- [2] Camacho, F., Berenguel, M., Rubio, F. Advanced Control of a Solar Plants. Ed. Springer, 1997.
- [3] Carmona, R. (1985). Análisis, Modelado y Control de un Campo de Colectores Solares Distribuidos con Sistema de Seguimiento de un eje. Ph. D Thesis. Universidad de Sevilla, 1985.
- [4] Cirre, C.M., Moreno, J.C., Berenguel, M. Robust QFT Controller of a Solar Collector Field. The Improving Human Potential Programme. Ed. CIEMAT, 2003.
- [5] Juuso E., Valenzuela L. (2003), Adaptive Intelligent Control of a Solar Collector Field. EUNITE 2003.
- [6] Meaburn, A., Hughes, F.M. Modelling and Control of a Solar Thermal Plants. Internal Report CIEMAT&UMIST, 1994.
- [7] Ogata, K. Ingeniería de Control Moderna. . Ed. Prentice Hall, 1998.
- [8] Solar Thermal Electricity Generation. Ed. CIEMAT, 1998.
- [9] The Improving Human Potential Programme. Ed. CIEMAT. 2002, 2003
- [10] Training and Mobility of researchers programme at Plataforma Solar de Almería.. Ed. CIEMAT. 1997,1998.