

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE UN RECEPTOR SOLAR VOLUMÉTRICO Y DE LA ETAPA DE POTENCIA DE UNA CENTRAL ELÉCTRICA TERMOSOLAR

J.D. Álvarez\*, M. Berenguel<sup>§</sup>, A. Valverde\*, M. Romero\*, L. Yebra\*, E.F. Camacho<sup>#</sup>, F.R. Rubio<sup>#</sup>

\* Plataforma Solar de Almería (PSA), Carretera Senés s/n, E-04200 Tabernas (Almería), P.O. Box: 22.  
[josedomingo.alvarez@psa.es, Antonio.Valverde@psa.es, [Luis.Yebra@psa.es](mailto:Luis.Yebra@psa.es); [Manuel.Romero@ciemat.es](mailto:Manuel.Romero@ciemat.es)]

<sup>§</sup> Universidad de Almería. Escuela Politécnica Superior. Dpto. de Lenguajes y Computación. Ctra. Sacramento s/n, 04120 Almería [beren@ual.es]

<sup>#</sup> Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingenieros. Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, Sevilla. [eduardo@esi.us.es, rubio@esi.us.es]

## Resumen

*En este trabajo se muestran someramente los esquemas de control desarrollados e implementados para poder operar de forma automática una planta solar de receptor central, caracterizada porque la energía incidente no puede ser manipulada. El trabajo pretende mejorar los esquemas de control existentes hasta el momento y que se han utilizado para la operación de la planta TSA, aprovechando además la instalación de un nuevo receptor volumétrico en la planta. El trabajo se centra en la descripción los sistemas de control del flujo de aire a través de receptor y en los sistemas de control de la etapa de potencia al no disponer de resultados de operación en la actualidad porque el nuevo receptor volumétrico está en fase de instalación.*

**Palabras Clave:** control de intercambiadores de calor, planta solar de receptor central, control PID.

## 1 INTRODUCCIÓN

La utilización de energías renovables para la producción de electricidad se está potenciando en la actualidad con la aparición de decretos que priman la producción por medio de dichas energías. En este trabajo se describen los esquemas de control concebidos para operar de forma automática una planta solar de receptor central, caracterizada porque la fuente de energía (radiación solar) no puede ser manipulable y está sujeta a cambios provocados por el ciclo solar diario y el paso de nubes. Las plantas de receptor central hacen uso de un campo de heliostatos que son espejos que reflejan la radiación solar sobre un receptor volumétrico situado en la parte superior de una torre. Los heliostatos siguen de forma automática al Sol por medio de algoritmos implementados en un microcontrolador que constituye el control local de los mismos. Un sistema

de control central (en la actualidad implementado en un microVax pero que va a ser sustituido por una estación de trabajo con sistema operativo LynxOS con software de control desarrollado en C++) se encarga de establecer una estrategia de apunte de grupos de heliostatos sobre determinados puntos del receptor solar para conseguir unas distribuciones de temperatura y flujo determinadas. A través del receptor volumétrico, circula aire impulsado por una soplante que se calienta y posteriormente transfiere su energía para producir vapor en un intercambiador de calor. Precisamente, este trabajo se centra en la descripción de esta etapa de la automatización de la operación con la planta de receptor central. A continuación se describe más en detalle el sistema y los esquemas de control desarrollados. Se muestran algunas imágenes con las interfaces persona-máquina desarrolladas y algunos resultados en simulación con los esquemas de control propuestos, dado que en la actualidad no se han podido realizar ensayos en campo por estar en proceso de instalación el nuevo receptor solar.

## 2 SISTEMA SOLAIR 3 MW

### 2.1 COMPONENTES DEL SISTEMA SOLAIR 3 MW

La configuración básica de la planta SOLAIR consiste en un receptor, un generador de vapor, un módulo sólido para el almacenamiento de calor, dos soplantes y sus correspondientes tubos de aire y reguladores que reflejan la configuración de la planta considerada de PHOEBUS.

La instalación está situada en lo alto de la torre CESA a 83 metros. La radiación solar incidente es reflejada por el campo de heliostatos y concentrada en la malla del absorbedor del receptor con una densidad de flujo media de 0.3 MW/m<sup>2</sup>. Existe una estrategia de apunte de grupos de heliostatos del campo sobre cinco puntos definidos sobre el receptor

para alcanzar la distribución de flujo y temperatura requeridas [3,4] Por lo tanto, el absorbedor se calienta y su calor es transferido al aire que fluye detrás, según el principio volumétrico. El aire abandona el receptor a 700° C. La soplante G1 controla el flujo a través del receptor y la soplante G2 el flujo a través del generador de vapor (tubo de una dirección). El generador de vapor está conectado al ciclo agua/vapor existente del complejo CESA. Un esquema de la planta se puede observar en la figura 1 y una imagen de la planta en la figura 2. Variando la velocidad de la soplante G1 se puede controlar la temperatura media del absorbedor y su temperatura de salida. Variando la velocidad de la soplante G2 se puede controlar la potencia suministrada por el generador de vapor. Dependiendo de la carga del generador de vapor, el almacenamiento del termocline puede actuar como suministrador o almacenador de energía. El cociente de la velocidad de la soplante de G1 a G2 determina el aire que atraviesa el almacenaje.

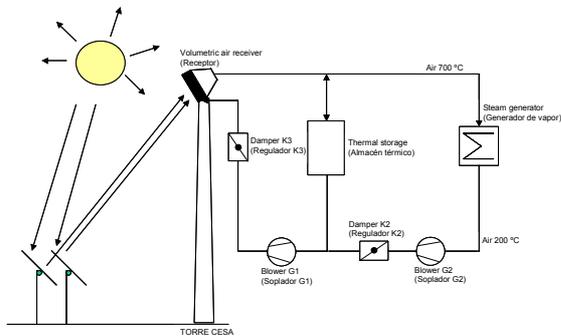


Figura 1. Esquema funcional de la planta CESA 1- Proyecto SOLAIR

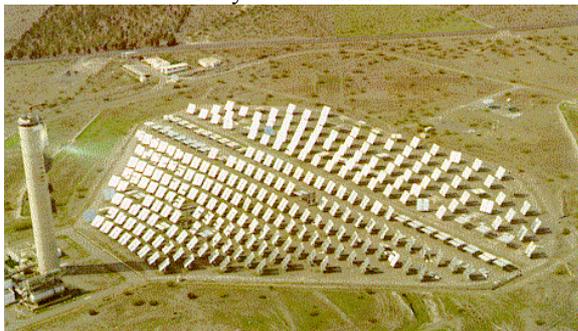


Figura 2. Imagen aérea de la Planta CESA-1

Los reguladores K3 y K2 son usados para operar la planta en diferentes modos, por ejemplo, receptor y almacenaje solamente o almacenaje y generador del vapor solamente. El regulador K2 es del tipo todonada, mientras que el regulador K3 puede alcanzar posiciones intermedias, siendo utilizado para reducir el flujo total del receptor cuando la velocidad de la soplante G1 alcanza un límite mínimo del 15 %. El aire extraído del generador o del almacenaje del vapor se recircula y se reinyecta delante del

absorbedor para reutilizar la energía contenida restante y reducir al mínimo las pérdidas del sistema.

## 2.2 SISTEMA DE CONTROL

El sistema SOLAIR se controla utilizando un sistema del control digital (DCS). Todos los datos de proceso relevantes procedentes de 9 IMPs (tarjetas de adquisición de datos comunicadas con el sistema central mediante un bus de datos) se muestran en la pantalla del operador, visualizando diagramas de proceso, componentes y gráficas que se han desarrollado a tal efecto. Las pantallas más importantes muestran la planta del sistema SOLAIR, las secciones del receptor y las secciones del almacenaje (figura 3).

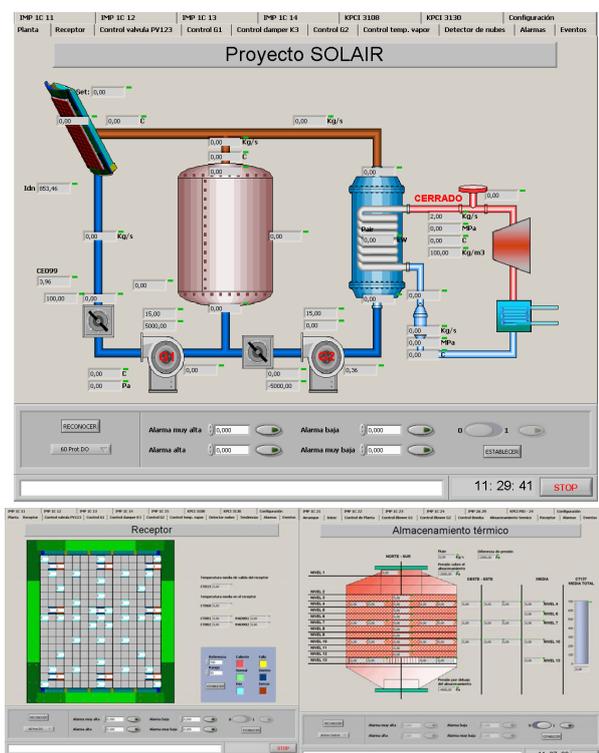


Figura 3. Pantallas de control desarrolladas

El DCS consiste en dos PCs interconectados (PC1 y PC2), los cuáles se unen al sistema SOLAIR por medio de tarjetas de entrada/salida analógicas/digitales (E/S A/D). Ambos funcionan con LabVIEW de National Instrument y el módulo denominado 'Datalogging and Supervisory Control Module', y se ejecutan bajo Windows XP Professional.

Como filosofía general, solamente un PC (PC2) puede utilizar los parámetros del proceso para manipulación. El otro (PC1) realiza la adquisición rápida de datos y ejecuta los algoritmos del control en lazo cerrado. Los datos importantes se transmiten en ambas direcciones vía red. PC1 recibe un total de

78 señales analógicas de las IMPs y el PC2 recibe 60 señales analógicas y 6 digitales. PC1 recibe principalmente señales referentes al nuevo receptor volumétrico, mientras que la mayoría de señales que recibe PC2 provienen del almacenamiento térmico. Un tercer computador (DAS) se utiliza para almacenar los datos y el análisis de éstos una vez se ha finalizado la operación. Un esquema del hardware se muestra en la figura 4.

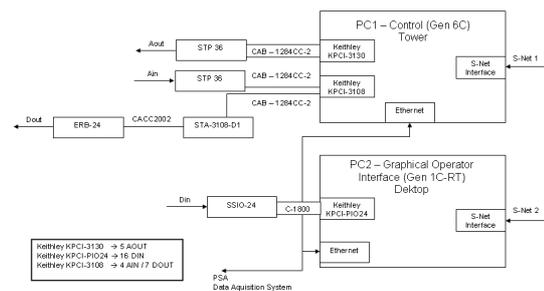


Figura 4: Configuración hardware del sistema

Existe un sistema adicional de parada de emergencia cableado (ESS – *Emergency Shutdown System*) realiza solamente funciones de seguridad (desenfoco de campo cuando alguna temperatura medida en el receptor excede de un límite establecido y lanzamiento del sistema de protección contra nubes cuando hay alguna transición de nubes para que no disminuya el flujo de aire caliente en el sistema).

Además de la estrategia de apunte tratada en [3] los algoritmos de control que se han venido utilizando para poder operar el sistema en modo automático son:

- Control de la temperatura del aire saliente del absorbedor: controlador PID con anti-windup de la soplante G1 y regulador K3, junto con un controlador anticipativo que añade una señal de compensación de perturbación a la soplante G1 si una transición es detectada mediante un sensor fotoeléctrico situado en el campo.
- Control de la potencia del generador de vapor: controlador PID con *anti-windup* para la soplante G2.
- Control de la temperatura del vapor: controlador del termostato de 3 puntos de la bomba de agua.
- Control de la presión del vapor: controlador PID de la válvula PV123 de vapor.

### 3. CONTROLADORES DEL SISTEMA SOLAIR 3 MW

#### 3.1 CONTROL DE LA TEMPERATURA MEDIA DEL ABSORBEDOR

La temperatura de salida del aire del receptor depende de la energía incidente sobre el receptor (dictada por la radiación solar y la estrategia de apunte) y del flujo de aire a través de receptor. La estrategia de apunte está estructurada para proporcionar valores casi uniformes de la temperatura en el receptor, por lo que se pretende controlar es la temperatura de salida del aire del absorbedor variando el flujo total de aire a través del receptor, usando como controladores la soplante G1 y del regulador K3, que son activados a modo automático o manual al mismo tiempo. Cuando se pasa de manual a automático se utiliza un mecanismo de transferencia sin saltos para ambos controladores.

Evidentemente, en condiciones de operación sin nubes se podrá mantener la temperatura de salida usando una estrategia clásica de control, actuando sobre la soplante G1 y el regulador K3. En presencia de nubes, será preciso incluir un efecto anticipativo basado en la medida de la radiación detectada por un sensor fotoeléctrico situado en el campo de heliostatos. En esos casos, la velocidad de la soplante G1 puede reducirse hasta el 15% y el regulador K3 empezará a actuar (mientras G1 no alcanza el umbral mínimo K3 está totalmente abierto). De hecho, el efecto de K3 es intentar conseguir un comportamiento lineal en la zona muerta de G1. En la actualidad, la apertura del regulador K3 depende de la masa de aire del receptor, abriendo o cerrando dicho regulador en escalones de 0.25%/s. Cuando la radiación se recupera, los controladores deben abrir K3 y aumentar la velocidad de la soplante G1, que puede dar lugar a oscilaciones si los controladores no están bien diseñados, activando el ESS si alguna temperatura en el receptor alcanza 900°C.

Como se ha indicado, la soplante G1 se utiliza para mantener la temperatura del aire medio del absorbedor en un valor constante que se pueda fijar manualmente. El lazo de control cerrado de G1 es realizado usando un algoritmo con anti-windup (debido a saturaciones de amplitud en entrada y influencia en término integral del paso de manual a automático y viceversa) y funciones de seguimiento de referencia. Para evitar oscilaciones en la salida y tener en cuenta las restricciones de amplitud en G1 y K3, velocidad de apertura de K3 y amplitud en temperatura de salida se ha planteado una modificación para llevar a cabo la implementación de un controlador predictivo con restricciones [1,2], dado que además el retardo es significativo comparado con la constante de tiempo dominante del sistema.

A esta salida del controlador de la soplante G1 se le sumará la señal proveniente del controlador del detector de nubes para anticiparse a los cambios de temperatura en el absorbedor. Esta señal proveniente del controlador del detector de nubes está calculada sobre la base de la radiación incidente  $I$  en el receptor (señal CE099), midiendo la variación de la radiación

del receptor se pretende adelantarse a los cambios de temperatura que pueda haber en el receptor. La señal que se le suma a la salida de la soplante G1 (tipo PD) es calculada con la fórmula (1):

$$Z_{out} = P \cdot I + D \cdot \Delta I \quad (1)$$

Donde P y D son dos parámetros que se calculan en función de la señal CE099. Esta señal no se le sumará siempre a la salida del controlador de la soplante G1, solo en ocasiones determinadas. Esta estrategia se ha mostrado muy enérgica en ensayos con el receptor TSA, por lo que está previsto incluir filtros en la nueva implementación para suavizar la acción de este término por prealimentación.

### 3.2 CONTROL DE LA POTENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR

Para controlar la potencia producida por el generador de vapor a un valor  $Set\_PSG$ , se varía el flujo de aire que le entra al generador por medio de la soplante G2.

La potencia del generador de vapor puede ser calculada mediante la siguiente expresión:

$$PairSG = F \cdot X \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (2)$$

donde:

- $PairSG$ : Es la potencia suministrada por el generador de vapor.
- $F$  (CF231): Es el flujo de aire de entrada al generador de vapor.
- $T_{in}$  (CT210): Es la temperatura media del aire caliente que entra al generador de vapor.
- $T_{out}$  (CT211): Es la temperatura media del aire frío que abandona el generador de vapor.
- $X$ : es el calor específico isobárico del aire y se calcula en función de la temperatura media del aire caliente de entrada al generador de vapor.

Para mantener el flujo deseado obtenido de la expresión (2) sustituyendo  $PairSG$  por  $Set\_PSG$  se ha diseñado un controlador PID con *anti-windup* para la soplante G2 (la dinámica del flujo másico se puede aproximar por un sistema sobreamortiguado). Lo mismo que en el caso del controlador descrito en la sección 3.1, se utiliza un mecanismo de transferencia sin saltos para que haya una transición suave en el paso del controlador de manual a automático y viceversa. Cuando el controlador se pase a automático el primer valor que tendrá la señal  $Set\_PSG$  será el último valor de la señal  $PairSG$ , cuando el controlador se pase a manual la primera salida de velocidad de la soplante G2 será la última que le suministraba la salida del controlador. Se supone que la dinámica de control del flujo de aire es

más rápida que la de control de temperatura de salida del intercambiador. En cualquier caso, un cambio de flujo de aire perturbará ligeramente la temperatura de salida del vapor. Una vez realizados los ensayos preliminares se evaluará la necesidad o no de incluir un mecanismo de reducción de interacciones (control multivariable o cascada).

### 3.3 CONTROL DE TEMPERATURA DE SALIDA DEL VAPOR

Otro lazo importante es el de control de la temperatura del vapor de salida del generador de vapor del sistema SOLAIR 3 MW (esquema de la figura 5). Actualmente para producir vapor se utilizan unas condiciones de temperatura y presión que son de 345° C para la temperatura y 4,5 MPa para la presión en entrada a turbina. Para mantener la presión constante se utilizará la soplante G2. Una vez que ésta haya pasado a control automático y se haya estabilizado la presión del flujo de aire, se puede controlar la temperatura por medio de la variación del caudal de la bomba de alimentación de agua. En la planta TSA se utilizaba un control discreto de varias posiciones (los PID diseñados por la empresa encargada producían comportamientos oscilatorios).

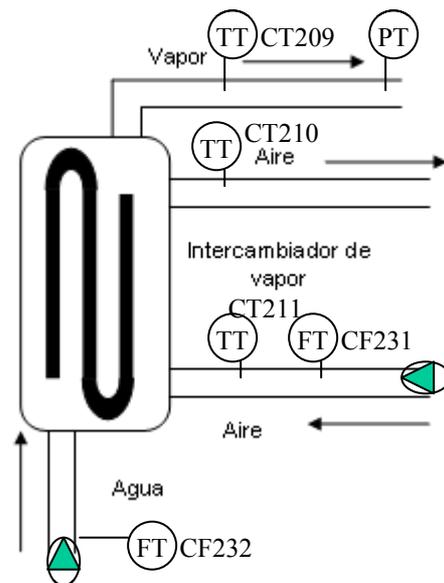


Figura 5. Esquema del intercambiador de calor

Las variables de este sistema son:

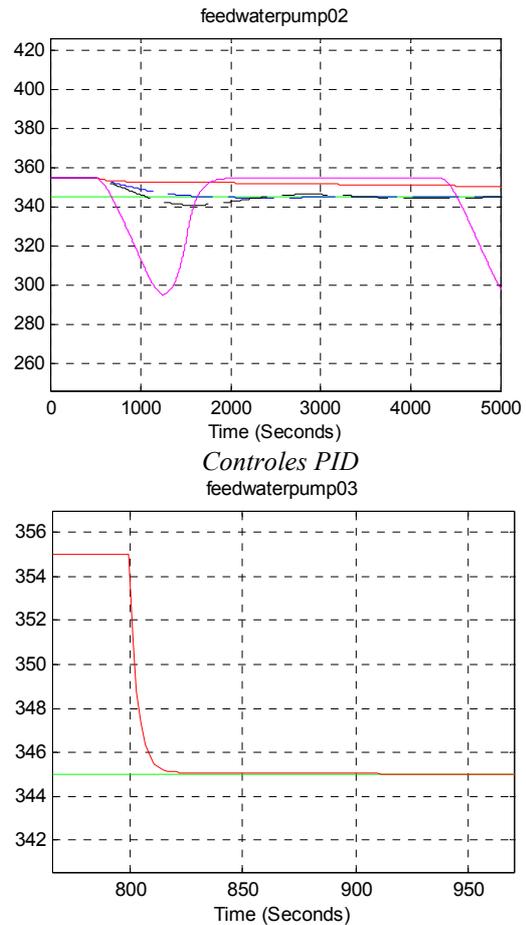
- Temperatura del vapor. Señal CT209.
- Temperatura de referencia del vapor. Señal Set CT209.
- Flujo total del agua de alimentación. Señal CF232.
- Apertura de la bomba de agua. Señal EA414.

El problema que tiene este lazo de control es que hay un gran retraso entre la variación en la apertura de la bomba de agua y los cambios que se producen en la temperatura del vapor, debido a que la bomba de agua se encuentra al pie de la torre CESA y el sensor que mide la temperatura se encuentra en la parte de arriba de la torre a 83 metros de altura (alors que hay que añadir la gran longitud de tubería en el interior del intercambiador)..

Actualmente se utiliza un controlador de 3 puntos que funciona solamente cada pocos minutos, ya que el intentar poner un controlador PID no dió buen resultado debido al retraso del sistema. El controlador actual incrementa en un 1% la velocidad de la bomba de agua si la temperatura del vapor está más de 2° C por encima de la referencia. La velocidad es reducida al valor antiguo sólo después de que la referencia sea alcanzada de nuevo. El controlador decreta en un 1% la velocidad de la bomba de agua si la temperatura del vapor está más de 5° C por debajo de la referencia. La velocidad es aumentada al anterior valor sólo después de que la referencia sea alcanzada de nuevo.

Para mejorar el control se ha estudiado en simulación y realizado la implementación en Labview de un controlador tipo Predictor de Smith [5] con retardo variable gobernado por el caudal de agua de alimentación al intercambiador de calor. Este tipo de control es el adecuado para sistemas con retraso más significativo que la constante de tiempo dominante del sistema. Como se ha indicado, el sistema tiene un retardo notable que además varía con la señal de control. Como es bien sabido, para que el predictor de Smith funcione adecuadamente debe existir poca incertidumbre en el retardo, por lo que el mismo se ha estimado a partir de las dimensiones físicas del proceso, longitud de las tuberías y flujo másico del fluido. La figura 6 muestra una simulación de controladores tipo PID con un cambio en la referencia de 10°C, donde se observa que la única forma de evitar comportamientos oscilatorios o inestables en este sistema es a costa de desintonizar los controladores obteniendo una respuesta excesivamente lenta para los requisitos de operación. La misma figura muestra varias simulaciones con un controlador tipo Predictor de Smith con retardo variable frente a distintos cambios en la referencia. Como se observa, el sistema responde rápidamente a los cambios de consigna. Estas simulaciones muestran cambios de consigna, obteniéndose resultados similares a perturbaciones en el caudal y la temperatura de salida. El sistema siempre va a operar en torno 345°C, hecho que hace que el carácter no-lineal del sistema no se vea muy acentuado. En función de los resultados que se obtengan en la implementación en el sistema real, se analizará la

conveniencia o no de incluir mecanismos que aumenten la robustez del esquema utilizado [1].



Control con Predictor de Smith

Figura 6. Simulaciones con control PID y Predictor de Smith con retardo variable

### 3.4 CONTROL DE PRESIÓN DE SALIDA DEL VAPOR

Con este controlador se persigue mantener constante la presión de salida del vapor, haciendo uso de una válvula, PV123, que se abrirá o cerrará en función de la presión de vapor existente en las tuberías. La válvula se abrirá para liberar vapor a la atmósfera y así disminuir la presión de éste.

El controlador utilizado, al igual que en los casos anteriores, es un PID con anti-windup. Las principales señales de este controlador son:

- Presión del vapor de salida. Señal CP225.
- Presión de referencia del vapor de salida. Señal Set CP225.
- Apertura de la válvula PV123. Señal EA417.

## Referencias

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] E.F. Camacho, C. Bordóns. Model Predictive Control. Springer, 1999.
- [2] S. Dormido, M. Berenguel, S. Dormido-Canto, F. Rodríguez. Interactive teaching of constrained predictive control. 6<sup>th</sup> IFAC Symp. on Advanced Education, Oulu, Finland, 2003.
- [3] F.J. García-Martín, M. Berenguel, A. Valverde, E.F. Camacho. Heuristic Knowledge-based Heliostat Field Control for the Optimization of the Temperature Distribution in a Volumetric Receiver. Solar Energy, 66(5), pp. 355-369, 1999.
- [4] M. Haeger, L. Keller, R. Monterreal, A. Valverde. Phoebus technology program solar air receiver (TSA). Internal Report PSA, 1996.
- [5] P. Ollero, E.F. Camacho. Control e Instrumentación de Procesos Químicos. Síntesis, 1997.