

MODELADO Y CONTROL DE UN CAPTADOR SOLAR TIPO FRESNEL

C. Martín Macareno, A. J. Gallego, M. Robledo, E. F. Camacho

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla

Camino de los Descubrimientos s/n 41092 Sevilla, España.

crismartin@cartuja.us.es, gallegolen@hotmail.com, marovazquez@gmail.com, eduardo@cartuja.us.es

Resumen

En este artículo se presenta el modelado matemático, así como algoritmos de control de un captador solar tipo Fresnel que pertenece planta de refrigeración solar situada en la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Se va a desarrollar un modelo de parámetros distribuidos, ajustando los parámetros del mismo con datos tomados del sistema real y comparando la respuesta del modelo con la salida del sistema. Por último, se implementará una estrategia de control clásica, un PID con un compensador de perturbaciones de tipo feedforward paralelo, cuyo desempeño será validado mediante simulación usando el modelo de parámetros distribuidos.

Palabras Clave: Modelado, Planta Solar, Fresnel, Feedforward, Control Predictivo.

1 Introducción

En los últimos años se ha producido un crecimiento considerable de las necesidades de refrigeración en los edificios, tanto por una mayor exigencia de las condiciones de confort como por el aumento de la carga térmica a causa del extenso uso de ordenadores personales o un mayor consumo de iluminación.

No obstante, existen tecnologías para refrigerar accionadas por fuentes térmicas, como la energía solar. Cuando se utiliza un sistema de refrigeración solar, además de las ventajas propias del uso de una fuente de energía renovable, cabe destacar la coincidencia entre la máxima demanda y la máxima producción (máxima radiación solar).

Los sistemas de concentración solar Fresnel son una nueva tecnología que pretende abrirse camino en competencia directa con los captadores de tipo cilindro-parabólicos.

Las ventajas de uso de los captadores solares tipo Fresnel en comparación con los captadores cilindro-parabólicos, se explican a continuación:

- Espejos y sistema de seguimiento de bajo coste.
- Tubo absorbedor fijo, no se necesitan juntas de alta presión flexibles.
- No se necesitan tubos de vacío.
- No se necesitan codos de expansión (el absorbedor está libre por un extremo para dilatarse).
- Reflectores planos y situados cerca del suelo, se reducen cargas de viento.
- Uso eficiente del suelo, las filas de colectores pueden situarse cerca una de la otra.
- Fácil acceso a las partes móviles y superficiales.

Se estima que la reducción de costes debido al uso de la tecnología Fresnel en comparación con los captadores cilindro-parabólicos, rondará el 50% cuando la tecnología se haya desarrollado lo suficiente [4].

Este artículo está organizado como sigue: En el apartado 2 se realiza una descripción de la planta real ubicada en Sevilla. En el apartado 3 se muestra los distintos modelos que se han realizado y su validación con datos reales tomados de la planta. En el apartado 4 se mostrarán los esquemas de control que se han realizado sobre el captador solar. En el apartado 5 se terminará con una serie de conclusiones a las que se ha llegado mediante la realización de este trabajo.

2 Descripción de la planta

La planta de refrigeración solar está ubicada en la azotea de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla (ESI). La radiación del sol se recoge en forma de calor en un captador solar de concentración de tipo Fresnel, utilizando como fluido caloportador agua a 180°C y 1.3 MPa. El agua sobrecalentada se utiliza para accionar una máquina de absorción de doble efecto, que transforma la energía térmica en frío apto para la climatización de varias dependencias de la Escuela. Cuando la irradiación es insuficiente para accionar la máquina

de absorción, la energía proporcionada por el gas natural sirve de apoyo para mantener el proceso en funcionamiento.

En la Figura 1 se muestra un esquema general de la planta, donde se pueden observar los principales componentes de la misma.

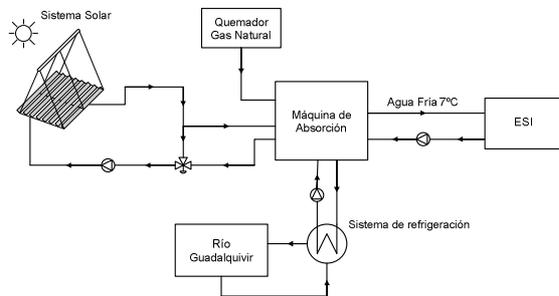


Figura 1: Esquema de la planta.

2.1. Sistema solar

El sistema solar está compuesto por un conjunto de captadores solares tipo Fresnel [4]. Son sistemas de foco lineal, es decir, concentran la radiación solar a lo largo de una línea, que corresponde a un tubo de absorción por el que circula un fluido térmico (en nuestro caso agua). El sistema concentrador está constituido por superficies reflectoras con un elevado radio de curvatura que interceptan y reflejan la radiación solar dirigiéndola hacia el tubo receptor, situado en un plano diferente al de reflexión. Una vez que la radiación llega al receptor, éste la convierte en energía térmica. Los elementos que constituyen este captador son los siguientes:

- Espejos primarios (concentradores reflectores de la radiación solar planos), hechos de vidrios de seguridad ligeramente curvados elásticamente y pegados a la estructura soporte, que es movida por un mecanismo de arrastre. Dicho mecanismo sirve para seguir la trayectoria del sol de modo que los espejos siempre estén enfocados hacia el colector y funciona de modo autónomo. Se tiene en total 352 m² de superficie reflectora.

- Receptor, formado por un tubo o varios tubos absorbedores, con o sin cubierta. El receptor se encuentra en un plano paralelo y superior a los concentradores planos. Por el interior de los tubos absorbedores circula el fluido caloportador. El tubo absorbedor se encuentra rodeado por una cubierta de vidrio para asegurar el vacío entre ambos.

- Reflector secundario, consistente en una envoltura delgada de metal y un espejo montado dentro de dicha cubierta. Su misión es reflejar la radiación solar que no incide directamente sobre el receptor

desde los espejos primarios, optimizando de este modo la eficiencia óptica del sistema.

- Estructura portante del conjunto. El captador solar se conecta con el resto del circuito hidráulico. La temperatura en el circuito hidráulico está limitada a un máximo de 200 °C y la presión a un máximo de 16 bar. La presión estándar de operación está limitada a 13 bar, y la válvula de liberación de presión está ajustada a 16 bar. El caudal nominal de agua será de 13 m³/h.

En la Figura 2 se puede observar los colectores solares situados en la planta.



Figura 2: Colectores solares Fresnel.

2.2. Máquina de absorción

La máquina de absorción transforma la energía térmica (agua caliente) en energía frigorífica empleada para enfriar el agua procedente de los equipos de acondicionamiento del edificio. Se basa en la transferencia de energía térmica desde un foco frío a otro caliente mediante la evaporación a baja presión de un fluido refrigerante.

Es una máquina de absorción de doble efecto con ciclo LiBr / agua modelo BROAD-BZH15. Tiene una potencia de refrigeración de 174 kW y un COP teórico de 1,34. Se acciona por agua sobrecalentada cuya temperatura tiene que encontrarse entre 145°C-165°C, de forma que si no llega a esa temperatura por la acción del captador solar se pone en funcionamiento el quemador de gas de este equipo.

En la Figura 1 se puede observar que para evitar el sobrecalentamiento de la máquina se aprovecha el circuito de agua de captación del río Guadalquivir, el cual posee un intercambiador de calor que permite no utilizar el agua directamente del río. De esta forma no es necesaria la utilización de torres de refrigeración.

Se tiene previsto instalar un tanque de almacenamiento de sales fundidas (hidroquinona), de forma que la planta pueda acumular los

excedentes de energía del campo solar y aprovecharlos en momentos de baja irradiación.

3 MODELO MATEMÁTICO

En esta sección, se describe el modelo matemático correspondiente al captador solar con espejos tipo Fresnel situado en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Fundamentalmente existen dos tipos de modelos para este tipo de plantas: el modelo de parámetros distribuidos, y el modelo de parámetros concentrados [1] y [3]. Ambos se describen a continuación.

3.1 MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS

El sistema consiste en un tubo de metal de 64 metros de longitud, por el cual circula agua a presión [6]. La radiación solar incide sobre la superficie de espejos y ésta es concentrada en el tubo, el cual transmite el calor al fluido. El modelo se puede describir por el siguiente par de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales:

$$\begin{aligned} \rho_m C_m A_m \frac{dT_m}{dt} &= IK_{opt} noG - HIG(T_m - T_a) - LHt(T_m - T_f) \\ \rho_f C_f A_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_f q \frac{\partial T_f}{\partial x} &= LHt(T_m - T_f) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde el subíndice m se refiere al metal, mientras el subíndice f se refiere al fluido. Los parámetros del modelo y sus unidades son los siguientes:

Tabla 1: parámetros y unidades

| Símbolo | descripción | Unidades |
|-----------|---|---------------------|
| t | Tiempo | s |
| x | Espacio | m |
| ρ | Densidad | kg/m ³ |
| C | Calor específico | J/°C Kg |
| G | Anchura de las filas de espejos | m |
| A | Área transversal | m ² |
| T(x,y) | Temperatura | °C |
| q | caudal | m ³ /s |
| I | radiación solar | W/m ² |
| no | eficiencia geométrica | sin unidad |
| K_{opt} | eficiencia óptica | sin unidad |
| Ta | Temperatura ambiente | °C |
| HI | Coefficiente de pérdidas térmicas | W/m ² °C |
| Ht | Coefficiente transmisión de calor metal-fluido | W/m ² °C |
| L | longitud de la circunferencia exterior de la tubería. | m |

La densidad ρ , el calor específico del fluido C, el coeficiente de pérdidas global dependen de la temperatura, y el coeficiente de transmisión de calor de la temperatura y del caudal. El ajuste del calor específico y la densidad se ha hecho mediante datos experimentales dados en tablas que proporcionan las propiedades del agua a presión con respecto a la temperatura. El cálculo del coeficiente de transmisión de calor es más complicado, ya que requiere el cálculo de número de Nusselt que implica el uso de fórmulas empíricas complejas [5]. Por último, el coeficiente de pérdidas térmicas se ha hallado mediante el ajuste con datos experimentales del captador solar. Las expresiones obtenidas han sido las siguientes:

$$\begin{aligned} \rho f &= -0.0025498T^2 - 0.20262T + 1003.91757 \\ C_f &= 5.1673e - 7T^4 - 0.0001568T^3 + 0.02767T^2 - 1.6264T + 4207.4039 \quad (2) \\ HI &= 0.001297(T_m - T_a) - 0.28585 \\ Ht &= (0.00013388T^4 - 0.0778T^3 + 18.72T^2 - 2573.11T + 410838.38)q^{0.8} \end{aligned}$$

El cálculo de la eficiencia geométrica es mucho más complejo. La eficiencia geométrica está formada por tres partes: el factor de sombra, la cantidad de irradiación que se pierde por no ser el espejo perpendicular al vector radiación, y la parte del tubo que queda en sombras. Cada una de estas partes involucra complejos cálculos trigonométricos, así como hacer uso de un modelo 2D y 3D de la planta [6]. Con respecto al término de la eficiencia óptica influyen varios factores también: la limpieza de los espejos la cual influye en su reflectividad, la limpieza de los reflectores primarios y secundarios, la absortancia del tubo de metal, así como otros factores que son difíciles de modelar. En general es un término que es bastante difícil de estimar, no sólo por la cantidad de factores que intervienen, sino también por la dificultad de obtener una medida fiable de cada uno de ellos. Para resolver las ecuaciones, un modelo de diferencias finitas ha sido programado, considerando cada segmento de 1 metro de longitud.

3.2 MODELO DE PARÁMETROS CONCENTRADOS

El modelo de parámetros concentrados, proporciona una descripción general de la planta. Considerando una descripción concentrada, la variación en la energía interna del fluido puede ser descrita por la ecuación:

$$C \frac{dT_{out}}{dt} = InoK_{opt}SI - qPcp(T_{out} - T_{in}) - HI(T_m - T_a) \quad (3)$$

Donde T_{out} es la temperatura de salida, I es la radiación solar, S es la superficie total del campo, T_{in} la temperatura de entrada, Pcp es un término que tiene en cuenta propiedades térmicas y geométricas

del lazo, H_l el coeficiente de pérdidas térmicas, T_a es la temperatura ambiente y T_m es la temperatura media entre la salida y la entrada. El modelo de parámetros concentrados tiene como inconvenientes que no tiene en cuenta la transmisión de calor metal-fluido ni la distribución espacial de las temperaturas. Su principal ventaja es la sencillez.

Para una descripción más detallada del desarrollo de un modelo de parámetros concentrados del captador solar consultar [6].

3.3 COMPARACIÓN DEL SISTEMA REAL CON EL MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS

En este apartado se muestra la comparación de la respuesta del modelo de parámetros distribuidos con la temperatura de salida del sistema real, para comprobar la similitud de la respuesta.

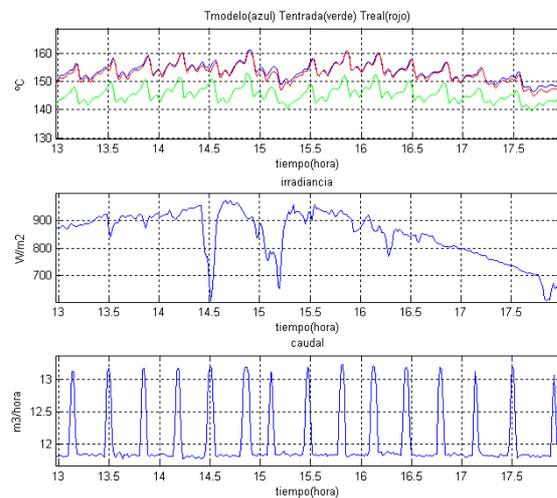


Figura 3: Comparación modelo-planta 29/06/09

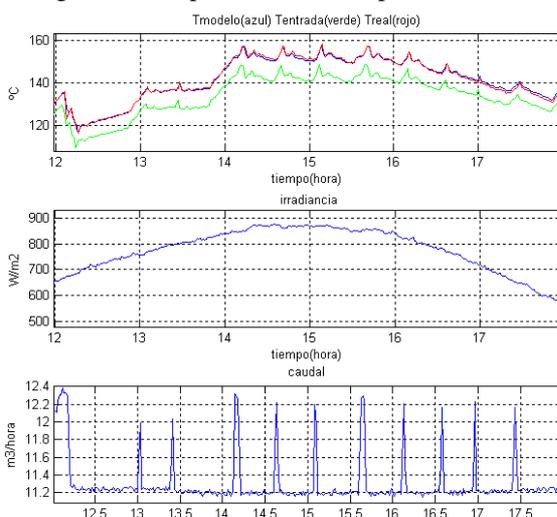


Figura 4: Comparación modelo-planta 17/08/09

Como las gráficas muestran, el modelo es bastante fiel a la realidad.

4 CONTROL DEL CAPTADOR SOLAR

En esta sección mostraremos los resultados obtenidos al controlar mediante simulación el sistema empleando una estrategia clásica como es el controlador PID, y como son mejoradas sus prestaciones con un compensador anticipativo en paralelo de la perturbaciones a la salida. Para ello emplearemos los datos reales mostrados en la Figura 3, correspondientes al 29 de junio de 2009.

4.1 PID.

Como es bien conocido, la función de transferencia que caracteriza a un PID es:

$$G_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right) \quad (4)$$

Siendo K_p la ganancia proporcional, T_i el tiempo integral y T_D el tiempo derivativo. Para sintonizar este controlador se ha empleado las tablas de Ziegler-Nichols en bucle abierto, y posteriormente se ha realizado un ajuste más fino, como se indica en [1]. Para la discretización de este controlador se ha empleado la aproximación de Tustin, y se ha añadido un filtro en el término derivativo para hacerlo estrictamente propio.

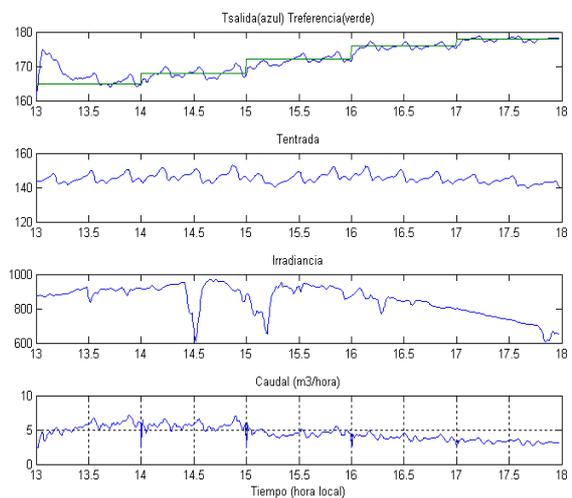


Figura 5: Control PID en el captador solar.

4.2 PID CON FEEDFORWARD PARALELO ESTÁTICO

Sin embargo, como puede verse en la Figura 5, la respuesta del controlador es deficiente, debido a que se ve muy afectada por las perturbaciones de la

salida, principalmente la temperatura de entrada del colector y la irradiancia. Dado que son perturbaciones medibles, se considera aconsejable aplicar un compensador anticipativo, por ejemplo, un feedforward con estructura paralelo. Hay dos variantes fundamentales para el feedforward: el feedforward en serie y el feedforward en paralelo [1]. El feedforward ha demostrado ser un elemento muy importante en este tipo de plantas para rechazar perturbaciones [2]. El esquema de control se muestra a continuación:

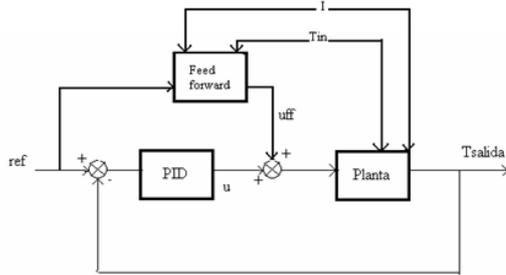


Figura 6: Esquema de control con feedforward paralelo

El feedforward paralelo se encargará de calcular un término que se sumará al caudal calculado por el PID. Éste se calculará de forma que proporcione la temperatura deseada a la salida en régimen permanente. Esto se hará recurriendo al modelo de parámetros concentrados mostrado en el apartado 3.2, forzando que T_{out} sea la temperatura de referencia, y T_m la temperatura media entre la temperatura de entrada y la referencia.

$$q_{ff} = \frac{InoK_{opt}SI - Hl(Tm - Ta)}{Pcp(Tref - Tin)} \quad (5)$$

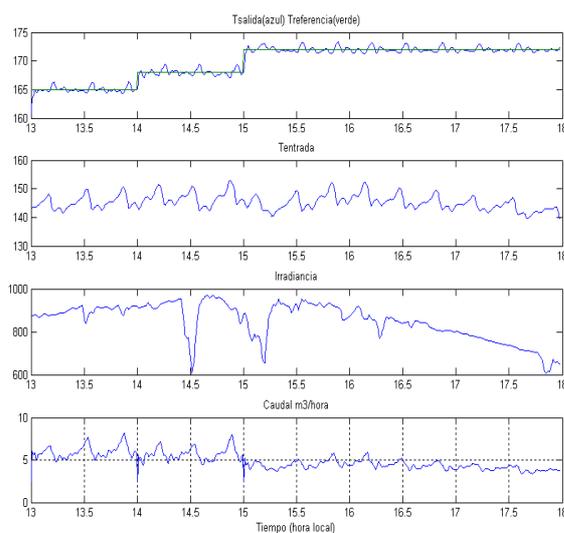


Figura 7: Control PID con feedforward paralelo estático

4.2 PID CON FEEDFORWARD PARALELO Y PERTURBACIONES FILTRADAS

Para mejorar aún más la respuesta de nuestro sistema puede optarse por añadir feedforward dinámico, que elimine completamente el efecto de las perturbaciones en la salida, modelado por $G_D(s)$.

$$G_{FF}(s) = -\frac{G_D}{G_p} = -\frac{K_L}{K} \frac{\tau s + 1}{\tau_D s + 1} e^{-(d_L - d)s} \quad (6)$$

Sin embargo, esto tiene como inconveniente que la planta presenta no linealidades muy acusadas, con lo que no podría compensarse del todo. Por ello, tras haber identificado las perturbaciones en varios puntos de funcionamiento, y comprobar que presentan un retardo de propagación mayor que el de la señal de control por la planta se optará por mantener el feedforward estático, pero filtrando sus perturbaciones con un retardo puro, de forma que reciba sus perturbaciones retrasadas en la misma cantidad que la diferencia entre dicho retardo y el retardo de la propia planta. Así, los resultados obtenidos se presentan en la siguiente gráfica:

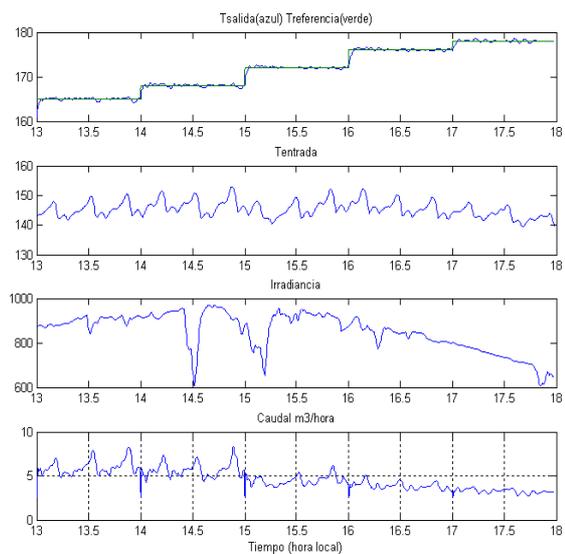


Figura 8: Control PID con feedforward paralelo con perturbaciones filtradas

Como se puede observar, el feedforward que tiene en cuenta el retardo en la temperatura de entrada, obtiene un rendimiento bastante mejor que si no se tuviera en cuenta dicho retardo.

5 CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el modelado y control de un captador solar de tipo Fresnel, ubicado en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Se

ha realizado una breve descripción de la planta total, así como el modelado matemático ajustado mediante datos reales tomados del captador, comprobándose a posteriori la alta fidelidad con la que el modelo matemático reproduce la dinámica de la planta.

Posteriormente se ha diseñado una estrategia de control PID+Feedforward en paralelo, validada mediante simulación con el modelo de parámetros distribuidos. Se ha propuesto una mejora del feedforward teniendo en cuenta el retardo que la perturbación de temperatura de entrada posee, comprobándose una gran mejora respecto al feedforward que no tiene en cuenta el retardo.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Comisión Europea por el proyecto DPI 2008-05818 y a la Junta de Andalucía por el proyecto P07-TEP-02720 que han financiado este trabajo, así como al Ministerio de Educación por la beca FPU del primer y segundo autor.

Referencias

- [1] Camacho, E.F, Berenguel, M., Rubio F., 1997. Advanced Control of Solar Plants. 1º Edición, Springer-Verlag.
- [2] Camacho, E.F, Rubio, F., Hughes, F., 1992. Self-tuning control of a solar power plants with a distributed collector field. /E. Control Systems 0272-1708/92/, 72-78.
- [3] Carmona, R. 1985. Análisis, modelado y control de un campo de colectores solares distribuidos con sistema de seguimiento en un eje. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- [4] Häberle., A., Berger, M., Luginsland, F., et al. Linear concentrating Fresnel collector for process heat applications. Proceedings of the 13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies: Spain. (2006).
- [5] Holman, J. P. 1998. Transferencia de Calor. Editorial: McGraw-Hill 1º Ed.
- [6] Robledo, M., Escaño, J.M, Núñez, A., Bordons, C., Camacho, E. F., Development and Experimental Validation of a Dynamic Model for a Fresnel Solar Collector. In Proceedings of 18th IFAC World Congress, 2010.