

# Un enfoque de control libre de modelo para el control de temperatura en hornos solares

Juan D. Gil<sup>a</sup>, Lidia Roca<sup>b</sup>, José L. Guzmán<sup>a</sup>, Manuel Berenguel<sup>a</sup>, Andrés López-Palenzuela<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Centro Mixto CIESOL, ceiA3, Universidad de Almería. Ctra. Sacramento s/n, Almería 04120, España

<sup>b</sup>Centro Mixto CIESOL, CIEMAT-Plataforma Solar de Almería, Ctra.de Senés s/n, Tabernas 04200, Almería, España.

Correos: juandiego.gil@ual.es (Juan D. Gil), lidia.roca@psa.es (Lidia Roca), joseluis.guzman@ual.es (José L. Guzmán), beren@ual.es (Manuel Berenguel), anlopal00@gmail.com (Andrés López-Palenzuela).

## Resumen

En el contexto de síntesis de materiales y pruebas de estrés térmico, los hornos solares cobran un papel fundamental. Estos sistemas experimentales se suelen operar normalmente de forma manual por operadores cualificados. Sin embargo, el uso de controladores automáticos puede ser esencial para tener en cuenta las diferentes dinámicas de las piezas tratadas, seguir los diferentes perfiles de temperatura requeridos en las pruebas y hacer frente a la intermitencia de la fuente principal de energía, la energía solar. Sobre estas bases, el presente trabajo propone un sistema de control libre de modelo sencillo y con pocos parámetros de ajuste para el control de temperatura en hornos solares. El controlador se basa en la metodología *Extremum Seeking Control* (ESC) y se complementa con un controlador por adelantado en configuración serie para el rechazo de perturbaciones de radiación. La estrategia propuesta se ha probado en simulación en un modelo validado del horno SF60 de la Plataforma Solar de Almería, usando datos meteorológicos reales de dicho emplazamiento<sup>1</sup>. A pesar de que la técnica ESC puede tener problemas de convergencia en presencia de perturbaciones rápidas, la inclusión del controlador por adelantado en serie hace que los resultados obtenidos pongan de manifiesto el buen desempeño del controlador, tanto para el seguimiento de referencias como para el rechazo de perturbaciones. Además, evidencian su fácil sintonía, lo que puede llegar a ser fundamental para su uso en la práctica por operadores que no sean expertos en el campo de la ingeniería de control.

**Palabras clave:** Energía solar, *Extremum Seeking Control*, Control por adelantado.

<sup>1</sup>Basado en los experimentos realizados en la Plataforma Solar de Almería.

## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día existe una gran preocupación por el uso de fuentes de energía que ayuden a combatir el cambio climático. Una de las fuentes con más potencial es la energía solar, la cual se puede convertir en energía térmica, mediante el uso de captadores térmicos solares, o en energía eléctrica, usando, por ejemplo, paneles fotovoltaicos [7, 12]. Sin embargo, la energía solar también se utiliza en otros campos de aplicación, como son la síntesis de materiales a alta temperatura, pruebas de estrés térmico, o para recrear las condiciones de reingreso de naves espaciales a la atmósfera terrestre. Todas estas aplicaciones suponen un reto desde el punto de vista de la ingeniería de control debido a la presencia de perturbaciones y no linealidades [1].

Particularizando en el contexto del tratamiento y pruebas de materiales, el uso de hornos solares juega un papel fundamental. Un horno solar consta de un sistema captador con seguimiento (normalmente un heliostato plano) y un concentrador parabólico estático que concentra un alto porcentaje de la energía solar recibida en su punto focal (área de ensayos). La cantidad de luz incidente se regula mediante un atenuador (*shutter*) situado normalmente entre el concentrador y el heliostato. Se debe destacar que estos sistemas experimentales se operan generalmente de forma manual por operadores cualificados, debido a la complejidad y diversidad de los materiales tratados, así como a los diferentes perfiles de temperatura a los que se los somete. De este modo, la eficiencia de la operación depende exclusivamente de la habilidad del operador. Sin embargo, la implementación de controladores automáticos puede llegar a ser fundamental para obtener resultados satisfactorios en diferentes condiciones de operación, lo que ha motivado la investigación en este campo [3].

Hasta el momento, la mayoría de técnicas de control propuestas se basan en estrategias de control no lineal, como la linealización por realimentación

[4], o estrategias de control predictivo basado en modelo (MPC, por sus siglas en inglés *Model Predictive Control*) [2, 8]. El problema de estas metodologías radica en que su rendimiento depende totalmente de un modelo, el cual debe ser recalibrado cada vez que se cambie el tipo de muestra de material a ensayar en el horno solar, dificultando así su aplicación práctica. Por este motivo, otra línea de investigación abierta es la aplicación de técnicas de control adaptativo. Este es el caso del trabajo presentado en [1], donde se propusieron varias estrategias de control adaptativas basadas en controladores Proporcionales, Integrales, Derivativos (PID), o de la estrategia propuesta en [6], la cual usa el mismo tipo de controladores pero con un principio de diseño diferente. Aunque estas estrategias resultan eficaces, ya que se adaptan a los diferentes tipos de materiales probados en el horno, su principal problema es su gran número de parámetros de ajuste tal y como se refleja en [6]. Este hecho puede llegar a ser nuevamente un impedimento para su aplicación y aceptación práctica.

Por tanto, y en base a las ideas expuestas, este trabajo propone un sistema de control libre de modelo, sencillo y con pocos parámetros de ajuste para el control de temperatura en hornos solares. El principal objetivo es cubrir las carencias de los sistemas de control propuestos hasta el momento, ya que: i) el hecho de no depender de un modelo hace que el sistema de control sea válido para los diferentes tipos de piezas probadas en el horno, sin necesidad de realizar nuevas recalibraciones, y ii) el controlador resultante tiene pocos parámetros de ajuste, lo que lo convierte en una estrategia intuitiva y fácil de usar para operadores que no sean expertos en el campo de la ingeniería de control. Concretamente, el sistema de control propuesto está basada en la metodología *Extremum Seeking Control* (ESC), la cual es una técnica de control libre de modelo que tiene como objetivo llevar al sistema a las condiciones óptimas de funcionamiento correspondientes al extremo de una función objetivo medible [16]. Además, el sistema de control se complementa con un controlador por adelantado en serie para el rechazo de perturbaciones de radiación, el cual ha sido implementado siguiendo las ideas expuestas en [1]. La estrategia de control se prueba en simulación en un modelo validado del horno solar SF60 localizado en la Plataforma Solar de Almería (PSA, [www.psa.es](http://www.psa.es)), usando datos meteorológicos reales de dicho emplazamiento. A pesar de que la técnica ESC puede tener problemas de convergencia en presencia de perturbaciones rápidas, la inclusión del controlador por adelantado en serie hace que los resultados preliminares evidencien el buen desempeño de la

técnica propuesta en el seguimiento de referencias y rechazo de perturbaciones.

El resto del artículo se divide como sigue: La Sección 2 muestra una descripción del horno solar usado como caso de estudio. La Sección 3 describe los métodos de control empleados y el controlador propuesto. La Sección 4 muestra los resultados en simulación y, por último, la Sección 5 recoge las principales conclusiones y trabajos futuros.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Un horno solar es una instalación compuesta por una serie de espejos reflectores que tienen como objetivo concentrar la radiación solar en un foco sobre el que se colocan las piezas que se desean tratar térmicamente. Como se puede observar en la Fig. 1, un horno solar consta de 4 elementos fundamentales. El primero de ellos es el sistema captador (helióstato), el cual se encarga de concentrar la radiación incidente sobre el atenuador o persiana. El atenuador, segundo elemento del horno, es el principal actuador de la instalación y se utiliza para controlar la cantidad de radiación que incide sobre el concentrador secundario. Este concentrador, tercer elemento de la instalación y ubicado en el interior de esta, refleja la radiación que ha pasado a través del atenuador o persiana sobre su punto focal. En este punto focal, cuarto elemento del horno, se sitúa la mesa de pruebas donde se colocan las diferentes piezas a tratar.

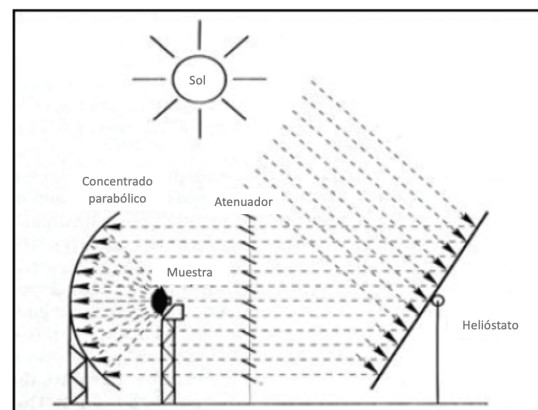


Figura 1: Diagrama esquemático general de un horno solar, adaptada de [1]

Como se ha mencionado anteriormente, el caso de estudio planteado en este artículo se basa en el horno SF60 de la PSA, ver Fig. 2. Este sistema cuenta con un heliostato de 130 m<sup>2</sup> con una eficiencia de reflectividad del 95 %. El atenuador o persiana, está formado por una serie de lamas cuyo grado de apertura varía entre 0 y 100 %. Se debe

hacer notar que la persiana tiene una limitación de velocidad de apertura por motivos de seguridad, de forma que cada segundo se puede abrir un máximo de un 8%. Este hecho debe ser contemplado a la hora de diseñar el sistema de control. El concentrador parabólico del horno SF60 tiene una superficie de reflexión de 108 m<sup>2</sup> con una reflectividad de 95%. Este concentrador refleja la radiación incidente en un foco que se corresponde con un círculo de 22 cm de diámetro, de forma que el área de foco es de 0.038 m<sup>2</sup>. Por último, el área o mesa de pruebas se sitúa en el espacio que rodea el foco del concentrador, en una torreta de 4 m de altura. Esta mesa consiste en un soporte móvil, donde se puede acoplar dispositivos auxiliares dependiendo del tipo de ensayo que se vaya a realizar. En concreto, para este trabajo se considerará que la pieza a tratar es de Carburo de Silicio, con unas dimensiones de 50.4×50.3×5.7 mm<sup>3</sup>. En [5], se presenta una descripción completa de la pieza considerada.



Figura 2: Imágenes de la instalación real usada como caso de estudio, cortesía de la PSA. Imagen superior: sistema captador y shutter. Imagen inferior: sistema concentrador y banco de ensayos.

### 3. ESTRATEGIA DE CONTROL

En esta sección se describen las diferentes metodologías de control usadas y se presenta el esquema general del controlador propuesto.

### 3.1. TÉCNICA *EXTREMUM SEEKING CONTROL*

La metodología ESC es una técnica de control libre de modelo en la cual se optimiza el comportamiento del sistema en estado estacionario basándose exclusivamente en medidas de una determinada función de coste. Su principal ventaja en comparación con otras técnicas de optimización en tiempo real o técnicas de control convencionales es que no requiere modelo del sistema. Este hecho le permite optimizar sistemas complejos, i.e., sistemas no lineales, en los cuales el modelo no se conoce con exactitud. La principal desventaja de esta técnica es que la convergencia a la solución óptima puede ser lenta [10].

Las bases de los controladores ESC son las siguientes. Considerando un sistema en el cual su comportamiento óptimo en estado estacionario se pueda formular como:

$$\min_{\mathbf{u}} J(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) \tag{1}$$

$$\text{s.t. } \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) = \mathbf{0}, \tag{2}$$

donde  $J \in \mathbb{R}$  es una función de coste escalar,  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n_x}$  es un vector que contiene las variables de estado,  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{n_u}$  es un vector que contiene las entradas,  $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^{n_p}$  es un vector que contiene las perturbaciones,  $\mathbf{f}(\cdot)$  son las  $n_x$  ecuaciones independientes del modelo, y  $\mathbf{0}$  es un vector de ceros de tamaño  $n_x$ .

**Suposición 3.1** Existe una función  $l: \mathbb{R}^{n_u} \times \mathbb{R}^{n_p} \rightarrow \mathbb{R}^{n_x}$  tal que,  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) = \mathbf{0}$ , si y solo si  $\mathbf{x} = l(\mathbf{u}, \mathbf{p})$ .

En base a esta suposición, el problema formulado en las Ecs. (1)-(2) se puede reescribir como  $J(l(\mathbf{u}, \mathbf{p}), \mathbf{u}, \mathbf{p})$ . De este modo, los estados del sistema se eliminan del problema original, y se puede llegar a optimizar su comportamiento manipulando exclusivamente la entrada,  $\mathbf{u}$ , para cualquier perturbación,  $\mathbf{p}$ .

**Suposición 3.2** Existe una solución  $\mathbf{u} = \mathbf{u}_{opt}(\mathbf{p})$  tal que:

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{u}}(\mathbf{u}_{opt}, \mathbf{p}) = 0, \tag{3}$$

$$\frac{\partial^2 J}{\partial \mathbf{u}^2}(\mathbf{u}_{opt}, \mathbf{p}) > 0. \tag{4}$$

Esta suposición asegura que el problema de optimización en estado estacionario es convexo con una solución óptima  $\mathbf{u} = \mathbf{u}_{opt}(\mathbf{p})$  para una determinada perturbación  $\mathbf{p}$ .

Considerando las suposiciones anteriores, las técnicas ESC utilizan medidas de la función objetivo y de las entradas para estimar el gradiente  $J_u$ , el cual se usa posteriormente para optimizar el comportamiento en estado estacionario del sistema, i.e., dirigir la función objetivo hacia su extremo (máximo o mínimo). Entre las diferentes técnicas para estimar el gradiente dentro de la metodología ESC, en este trabajo se ha optado por el enfoque presentado en [11], en el cual el gradiente se obtiene usando la técnica de mínimos cuadrados. Así, el controlador resultante es intuitivo y fácil de aplicar y, además, requiere menos parámetros de ajuste que las técnicas ESC convencionales [15]. Particularmente, en la técnica ESC basada en mínimos cuadrados, se emplea una ventana “en movimiento” (buffer) de datos compuesta por las últimas  $N$  medidas para ajustar la función objetivo  $J$  mediante un modelo lineal de la forma:

$$J = \mathbf{J}_u^T \mathbf{U} + \gamma, \tag{5}$$

donde  $\mathbf{J}_u \in \mathbb{R}^{n_u}$  es el vector de gradientes de la función de coste ( $J$ ) respecto al vector de entradas  $\mathbf{U}$ , y  $\gamma \in \mathbb{R}$  es un coeficiente de *offset*. Nótese que la nomenclatura  $(\cdot)^T$  indica la transpuesta.

Definiendo  $k$  como el tiempo de muestreo actual,  $\mathbf{J} = [J_k, \dots, J_{k-N+1}]^T \in \mathbb{R}^N$  como el vector que contienen las últimas  $N$  medidas de la función objetivo, y  $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_k, \dots, \mathbf{u}_{k-N+1}]^T \in \mathbb{R}^{N \times n_u}$  como el vector de las últimas  $N$  muestras de la entrada, el gradiente se puede estimar a través de la técnica de mínimos cuadrados como [13]:

$$\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}} \|\mathbf{J} - \boldsymbol{\Omega}^T \boldsymbol{\theta}\|_2^2, \tag{6}$$

donde  $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^{n_u+1}$  es un vector que contiene los parámetros a estimar:

$$\boldsymbol{\theta} = [\mathbf{J}_u^T \quad \gamma]^T, \tag{7}$$

y  $\boldsymbol{\Omega} \in \mathbb{R}^{N(n_u+1)}$  es el vector regresor:

$$\boldsymbol{\Omega} = [\mathbf{U} \quad \mathbf{1}]^T. \tag{8}$$

La solución analítica de este problema viene dada por:

$$\tilde{\boldsymbol{\theta}} = [\boldsymbol{\Omega}^T \boldsymbol{\Omega}]^{-1} \boldsymbol{\Omega}^T \mathbf{J} \tag{9}$$

Una vez que se estima el gradiente, el último paso del método consiste en usar  $n_u$  controladores integrales para calcular las señales de control  $\mathbf{u}$  que conduzcan al sistema hacia la dirección deseada. De forma matricial, y en tiempo discreto, los controladores integrales se pueden formular como:

$$\mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{u}_k + T_s \mathbf{K}_I \mathbf{J}_u, \tag{10}$$

donde  $T_s$  es el tiempo de muestreo y  $\mathbf{K}_I \in \mathbb{R}^{n_u \times n_u}$  es una matriz diagonal de ganancias. Con el fin de clarificar la aplicación del método ESC, la Fig. 3 presenta un diagrama esquemático completo de la técnica ESC descrita para el caso de un sistema con una entrada y una salida.

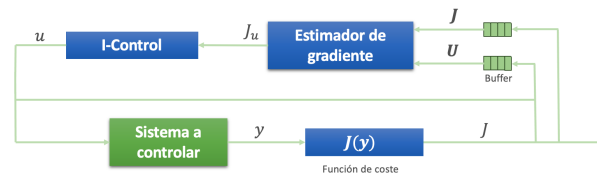


Figura 3: Diagrama esquemático básico de la técnica ESC, donde  $y$  se refiere a la salida del sistema.

### 3.2. TÉCNICA PARA LIMITAR LA SEÑAL DE CONTROL

Como se ha mencionado en la Sección 2, el horno solar SF60 tiene unas limitaciones de seguridad referidas a la apertura de la persiana que son necesarias respetar y tener en cuenta en el sistema de control. Estas limitaciones se traducen en restricciones en la variación de la señal de control,  $\Delta u$ . Sin embargo, al utilizar una técnica de control basada en gradiente, las limitaciones deben estar referidas al gradiente calculado, de forma que  $J_u$  debe estar restringido a un valor máximo  $J_u^{max}$ , esto es,  $|J_u| \leq J_u^{max}$ . Este valor máximo se puede relacionar de forma analítica con el valor máximo de la variación de la señal de control,  $\Delta u^{max}$ , como:

$$J_u^{max} = \frac{\Delta u^{max}}{T_s \cdot K_I} \tag{11}$$

Así, añadiendo este mecanismo a la estructura de control, se respetaría la restricción de velocidad de apertura del horno solar en las señales de control generadas por el método ESC, la cual es  $\Delta u^{max} = 8\%/s$ .

### 3.3. CONTROL POR ADELANTO

Como se ha mostrado en la Sección 3.1, la técnica ESC se basa en optimizar al sistema en estado estacionario. En este sentido, la aparición de perturbaciones rápidas, como es el caso de la radiación solar, puede hacer que el desempeño de la técnica ESC no sea el esperado, ya que induciría errores en el cálculo del gradiente que pueden llegar a desestabilizar al controlador. Por este motivo, y con el objetivo de desacoplar el efecto de la radiación solar, se ha incluido un control anticipativo en serie con el controlador siguiendo las ideas presentadas en [1]. La función de transferencia de este

controlador por adelanto es  $G_{ff} = I_{ref}/I$  donde  $I_{ref}$  representa un valor de radiación de referencia e  $I$  representa el valor medido de la radiación solar  $[W/m^2]$ . Nótese que al estar en configuración en serie, esta función de transferencia multiplica directamente a la señal de control. La base de esta aproximación es que la radiación solar afecta al sistema multiplicando al término de control en la cadena directa (Ec. (12)). Se debe remarcar que este tipo de controlador por adelanto resulta idóneo para el objetivo que se busca en este trabajo, ya que no depende de un modelo del sistema, sino que depende de un valor de referencia que puede ser fácilmente identificado por un operador. De este modo, cuando  $I_{ref} > I$ , la radiación solar habrá disminuido, haciendo que aumente la ganancia del controlador por adelanto provocando un incremento de la señal de control, de forma que se contrarresta la variación de la radiación.

### 3.4. CONTROLADOR PROPUESTO

Una vez expuestas las diferentes técnicas usadas, en este apartado se describe el controlador propuesto. El diagrama esquemático de dicho controlador se presenta en la Fig. 4. Lo primero que se puede apreciar es que el esquema de control se ha dividido en dos capas separadas temporalmente: i) una para el controlador por adelanto, la cual se ejecuta con un tiempo de muestreo de 1 s con el objetivo de rechazar perturbaciones rápidas de radiación, y ii) otra para el controlador ESC, la cual se ejecuta cada 30 s (atendiendo al tiempo de establecimiento del sistema), con el objetivo de cumplir el requerimiento de la técnica ESC de que el sistema esté en estacionario.

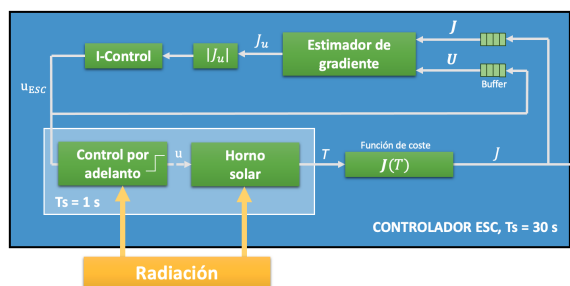


Figura 4: Diagrama esquemático del controlador propuesto.

En lo que respecta a la técnica ESC, la función objetivo se ha implementado como  $J = (T_{ref} - T)^2$ , donde  $T_{ref}$  es la referencia deseada y  $T$  la temperatura de la pieza. De este modo, la función objetivo es convexa para una referencia dada (requerimiento fundamental de la técnica ESC) y el controlador tratará de seguir dicha referencia para minimizar la función. Se debe remarcar que el

bloque que hay entre el estimador de gradiente y el controlador integral en la Fig. 4 implementa la regla descrita en la Ec. (11) para asegurar que el controlador ESC no proporcione señales de control que violen los límites de seguridad de la planta. Del mismo modo, como se muestra en la Fig. 4, la salida del controlador por adelanto se ha limitado para evitar sobrepasar la velocidad de apertura de la persiana cuando haya nubes pasantes.

## 4. RESULTADOS

En este apartado se presenta los resultados obtenidos con la aplicación del controlador propuesto. En primer lugar, se describe brevemente el modelo usado para las pruebas en simulación del sistema de control y, posteriormente, se presentan los resultados obtenidos.

### 4.1. MODELO DEL SISTEMA

Para realizar las simulaciones se ha utilizado como referencia el modelo dinámico no lineal presentado y descrito en [1]. Este modelo se ha insertado en el bloque “Horno solar” de la Fig. 4 en las simulaciones, y viene dado por la siguiente ecuación:

$$m_s \cdot c_s \cdot \frac{dT(t)}{dt} = \frac{\rho_c \cdot \rho_h \cdot S_c}{S_{f90} \cdot \sin(\alpha_o)} \cdot S_p \cdot \alpha_a \cdot I(t) \cdot \left( \sin(\alpha_o) - \sin \left[ \left( 1 - \frac{u(t)}{100} \right) \alpha_o \right] \right) - \alpha_e \cdot \sigma \cdot S_p \cdot (T^4(t) - T_a^4(t)) - \alpha_c \cdot S_p \cdot (T(t) - T_a(t)), \quad (12)$$

donde la entrada del modelo es la apertura de la persiana  $u(t)$  [%], las perturbaciones son la radiación  $I(t)$   $[W/m^2]$  y la temperatura ambiente  $T_a(t)$  [K], y la salida es la temperatura de la pieza  $T(t)$  [K]. El resto de parámetros están relacionados con magnitudes físicas del horno y de la pieza considerada y se presentan en la Tabla 1. Toda la información detallada acerca del modelo y de los parámetros de la pieza y del horno se puede encontrar en [1, 5, 14].

### 4.2. RESULTADOS EN SIMULACIÓN

La estructura de control propuesta tiene 3 parámetros de ajuste los cuales pueden ser fácilmente sintonizados. El primero de ellos es la radiación de referencia usada en el controlador por adelanto,  $I_{ref}$ . Este parámetro es sencillo de sintonizar ya que debe de estar relacionado con valores nominales de radiación de días soleados del emplazamiento donde se encuentre el horno solar [1]. En este caso, considerando la población de Tabernas



| Parámetro                          | Símbolo    | Valor                                      |
|------------------------------------|------------|--|
| Calor específico de la pieza       | $c_s$      | 1142 J/kgK                                 |
| Masa de la pieza                   | $m_s$      | 25.04 g                                    |
| Superficie del captador            | $S_c$      | 108 m <sup>2</sup>                         |
| Superficie del foco 90 %           | $S_{f90}$  | 0.038 m <sup>2</sup>                       |
| Superficie de la pieza             | $S_p$      | 0.0025 m <sup>2</sup>                      |
| Coefficiente de absorción la pieza | $\alpha_a$ | 0.46                                       |
| Coefficiente de película           | $\alpha_c$ | 33.94 W/(m <sup>2</sup> K)                 |
| Emisividad de la pieza             | $\alpha_e$ | 0.54                                       |
| Ángulo de cierre                   | $\alpha_o$ | 50.8 °                                     |
| Reflectividad del captador         | $\rho_c$   | 95 %                                       |
| Reflectividad del helióstato       | $\rho_h$   | 95 %                                       |
| Constante Stefan Boltzmann         | $\sigma$   | 5.67·10 <sup>-8</sup> W/(m <sup>2</sup> K) |

Tabla 1: Parámetros del modelo del sistema.

(Almería, sureste de España),  $I_{ref}$  se fijó en 900 W/m<sup>2</sup>. Los otros dos parámetros de ajuste se corresponden con parámetros de la técnica ESC. Por un lado, se debe fijar el tamaño  $N$  de los buffers de datos usados para la estimación del gradiente. El tamaño de estos buffers no puede ser muy grande para que las medidas usadas para estimar el modelo lineal presentado en la Ec. (5) estén cercanas al punto de operación actual  $y$ , por tanto, el modelo tenga validez tal y como se comentó en [9]. Así, este parámetro se fijó como  $N = 3$ . Por otro lado, el último parámetro de sintonía es la ganancia del controlador integral, el cual se ha fijado en  $6.2 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  por prueba y error hasta obtener el comportamiento deseado en bucle cerrado. Se debe remarcar que este parámetro también es sencillo de sintonizar ya que está directamente relacionado con la velocidad de convergencia de la técnica ESC. Por último, cabe mencionar que  $\Delta u^{\max}$  se ha fijado a 8%/s de acuerdo con las especificaciones de seguridad de la instalación.

Así, la prueba realizada en simulación se muestra en la Fig. 5. Para realizarla, se usaron datos meteorológicos reales, i.e., datos de radiación y temperatura ambiente, del día 6 de mayo de 2022 de la PSA. En el test, la temperatura inicial de la pieza fue de 620 °C. Se debe mencionar que antes de conectar el controlador en modo automático (al inicio de la operación del sistema), se introduje-

ron tres pequeños escalones de 0.15 % de amplitud en la señal de control en tres instantes de muestreo sucesivos (instantes de muestreo referidos al muestreo de la técnica ESC). El objetivo de estas variaciones es rellenar los *buffers* de datos de la técnica ESC antes de que se inicie la operación automática. Posteriormente, se arrancó el controlador, el cual convergió rápidamente a la temperatura de referencia como se puede apreciar en la Fig. 5-(1). En el instante 11:03 h, se introdujo un escalón en la referencia de 150 °C con el objetivo de simular los típicos cambios de temperatura a los que se somete a las piezas en operaciones reales y analizar el desempeño del controlador ante estas situaciones. Como se puede apreciar Fig. 5-(3), el cambio en la referencia hizo que la función objetivo de la técnica ESC aumentara su valor, de forma que el controlador comenzó a incrementar la señal de control (ver Fig. 5-(2)) para minimizarla. El tiempo de establecimiento en la nueva referencia fue de 13 min obteniendo una sobreoscilación de en torno al 15%. Entre los instantes 12:00 y 12:30 h se pueden observar nubes pasantes en la curva de radiación, ver Fig. 5-(2). Como se puede apreciar en la Fig. 5-(2), estas perturbaciones son rechazadas por el control por adelantado sin comprometer el desempeño ni desestabilizar al controlador ESC. En el instante 12:45 h, se introdujo un nuevo cambio en la referencia de 150 °C. El efecto de este cambio en la función objetivo fue similar al anterior, ver Fig. 5-(3). En este caso, el tiempo de establecimiento fue de 12 min y la sobreoscilación del 2%. Nótese que las diferencias respecto al cambio de referencia anterior son debidas a la dinámica del sistema en los diferentes puntos de operación.

Por último, se debe mencionar que los mecanismos introducidos en el sistema de control para no violar las restricciones de seguridad del horno solar funcionaron correctamente tanto en los cambios de referencia como en el rechazo de perturbaciones. En la Fig. 5-(2) se muestra la señal de control máxima y mínima permitida en cada instante. Como se puede apreciar, estos límites no se violan en ningún momento, por lo que el funcionamiento de la técnica de control propuesta es el adecuado en términos de requisitos de seguridad.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo presenta una técnica de control libre de modelo para el control de temperatura en hornos solares. La técnica propuesta es fácil de sintonizar, con solo tres parámetros de ajuste que se pueden fijar intuitivamente, y se puede adaptar a las diferentes piezas tratadas en estos sistemas,

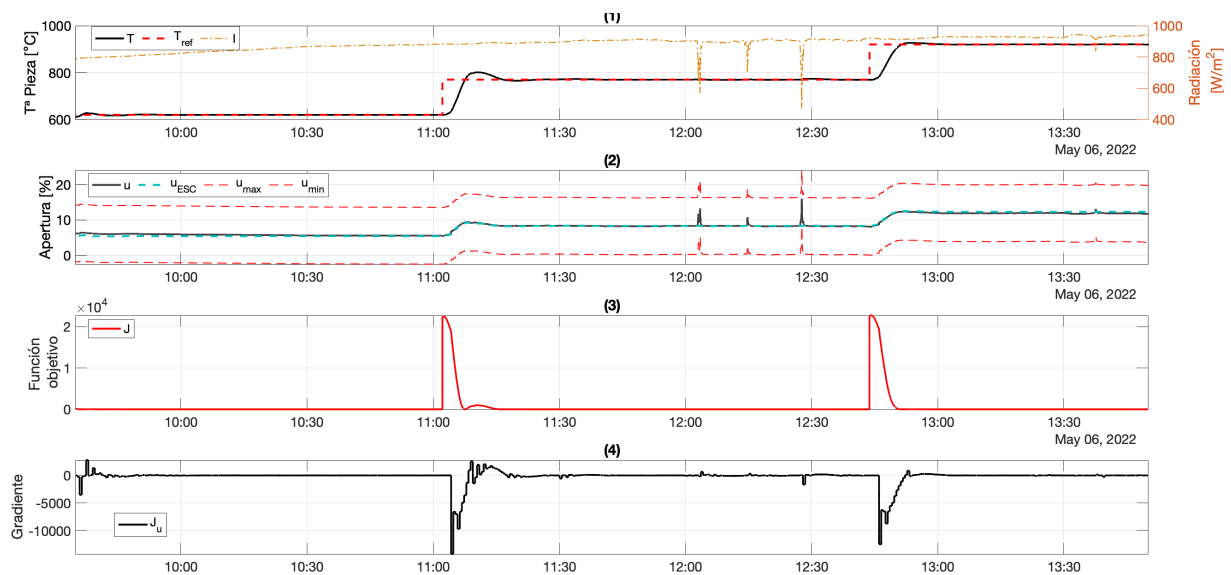


Figura 5: Prueba en simulación del controlador con datos meteorológicos del día 6 de mayo de 2022 de la PSA. (1) Temperatura de la pieza (T), referencia deseada ( $T_{ref}$ ) y radiación solar (I); (2) apertura de la persiana (u), señal de control proporcionada por la técnica ESC ( $u_{ESC}$ ) y señal de control máxima y mínima permitida en cada instante de simulación ( $u_{max}$  y  $u_{min}$ ); (3) valor de la función objetivo de la técnica ESC (J); y (4) gradiente estimado ( $J_u$ ).

cubriendo así las principales carencias de los controladores propuestos hasta el momento para este tipo de sistemas. Además, incluye un control por adelantado para el rechazo de perturbaciones de radiación. Las pruebas realizadas en simulación con un modelo validado del horno solar SF60 de la PSA muestran el buen desempeño de la estrategia propuesta tanto para el seguimiento de referencias, con tiempos de establecimiento de unos 13 min, como para el rechazo de perturbaciones. Todo esto respetando los límites de seguridad de la instalación en términos de velocidad de apertura de la persiana.

Los trabajos futuros estarán enfocados en mejorar la rapidez de convergencia de la técnica ESC así como en probar su desempeño en el sistema real.

**Agradecimientos**

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto “Microrredes para el autoabastecimiento solar de entornos productivos aislados (Microprod-Solar)” con código PCI2019-103378, financiado por la Agencia estatal de Investigación del Gobierno de España y por el Programa Iberoamericano de Ciencia y tecnología para el desarrollo (CYTED). Juan D. Gil agradece el apoyo económico del programa Personal Investigador Doctor de la Junta de Andalucía 2021, número de beca POSTDOC\_21\_00854. Además, agradecemos a la Plataforma Solar de Almería por facilitar el acceso a sus instalaciones.

**English summary**

**A model-free control approach for temperature control in solar furnaces**

**Abstract**

In the context of material synthesis and thermal stress tests, solar furnaces play a fundamental role. These experimental systems are usually operated manually by qualified operators. However, the use of automatic controllers can be essential to deal with the different dynamics of the treated parts, follow the different temperature profiles required in the tests, and deal with the intermittency of the main energy source, solar energy. On these bases, the present work proposes a model-free control system, simple and with few tuning parameters, for temperature control in solar furnaces. The controller is based on the Extremum Seeking Control (ESC) methodology and is complemented by a feedforward in series configuration for the rejection of irradiance disturbances. The proposed strategy has been tested in simulation in a validated model of the SF60 solar fur-

nace of the Plataforma Solar de Almería, using real meteorological data from said site. Although the ESC technique may have convergence problems in the presence of fast disturbances, the inclusion of the series feedforward controller leads to a good performance of the controller, both for reference tracking and disturbance rejection. In addition, they show their easy tuning, which can become essential for their use in practice by operators who are not experts in the field of control engineering.

**Keywords:** Solar Energy, Extremum seeking Control, feedforward.

## Referencias

- [1] M. Berenguel, E. F. Camacho, F. J. García-Martín, and F. R. Rubio. Temperature control of a solar furnace. *IEEE Control Systems Magazine*, 19(1):8–24, 1999.
- [2] M. Beschi, M. Berenguel, A. Visioli, J. L. Guzmán, and L. J. Yebra. Implementation of feedback linearization GPC control for a solar furnace. *Journal of Process Control*, 23(10):1545–1554, 2013.
- [3] M. Beschi, M. Berenguel, A. Visioli, and L. Yebra. Constrained control strategies for disturbance rejection in a solar furnaces. *Control Engineering Practice*, 21(10):1410–1421, 2013.
- [4] M. Beschi, A. Visioli, M. Berenguel, and L. Roca. A feedback linearization-based two-degree-of-freedom constrained controller strategy for a solar furnace. In *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 3228–3233. IEEE, 2013.
- [5] I. Cañadas, V. M. Candelario, G. De Aloysio, J. Fernández, L. Laghi, S. Cuesta-López, Y. Chen, T. J. Marrow, A. Rinaldi, A. M. Sanchez, et al. Characterization of solar-aged porous silicon carbide for concentrated solar power receivers. *Materials*, 14(16):4627, 2021.
- [6] B. A. Da Costa and J. M. Lemos. An adaptive temperature control law for a solar furnace. *Control Engineering Practice*, 17(10):1157–1173, 2009.
- [7] A. J. Gallego Len, A. J. Sánchez del Pozo, and E. F. Camacho. Aplicaciones de control predictivo en plantas solares CCP. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 2022. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.16664>.
- [8] W. Garcia-Gabin, D. Zambrano, and E. F. Camacho. Sliding mode predictive control of a solar air conditioning plant. *Control Engineering Practice*, 17(6):652–663, 2009.
- [9] J. D. Gil, L. Roca, G. Zaragoza, M. Pérez, and M. Berenguel. Improving the performance of solar membrane distillation processes for treating high salinity feeds: A process control approach for cleaner production. *Journal of Cleaner Production*, 338:130446, 2022.
- [10] M. Guay and D. J. Burns. A comparison of extremum seeking algorithms applied to vapor compression system optimization. In *2014 American Control Conference*, pages 1076–1081. IEEE, 2014.
- [11] B. Hunnekens, M. Haring, N. van de Wouw, and H. Nijmeijer. A dither-free extremum-seeking control approach using 1st-order least-squares fits for gradient estimation. In *53rd IEEE Conference on Decision and Control*, pages 2679–2684. IEEE, 2014.
- [12] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adedun, and K.-H. Kim. Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:894–900, 2018.
- [13] L. Ljung. System identification-theory for the user. 2nd edition. Prentice-Hall. *Upper Saddle River, NJ*, 1999.
- [14] J. Rodriguez, I. Cañadas, R. Monterreal, R. Enrique, and J. Galindo. PSA SF60 solar furnace renewed. In *AIP Conference Proceedings*, volume 2126, pages 30–46. AIP Publishing LLC, 2019.
- [15] J. Straus, D. Krishnamoorthy, and S. Skogestad. On combining self-optimizing control and extremum-seeking control—applied to an ammonia reactor case study. *Journal of Process Control*, 78:78–87, 2019.
- [16] C. Zhang and R. Ordóñez. *Extremum-seeking control and applications: a numerical optimization-based approach*. Springer Science & Business Media, 2011.



© 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC-BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).