

Jornadas de Automática

Control híbrido de temperatura en concentradores solares bajo irradiancia solar estocástica

Aitor Molina^{a,*}, Juan I. Mulero-Martínez^b, Alfonso Baños^a

^aDpto. de Informática y Sistemas, Universidad de Murcia, 30100, Murcia, España.

^bDpto. de Automática, Ingeniería Eléctrica y Tecnología Electrónica, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España.

To cite this article: Molina, A, Baños, A, Mulero-Martínez, J.I. 2026. Hybrid temperature control in solar concentrators under stochastic solar irradiance. Jornadas de Automática, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13713>

Resumen

Se estudia el modelado e implementación de estrategias de control híbrido para la regulación de temperatura en una planta térmica alimentada mediante energía solar por medio de un concentrador solar parabólico PDC. En particular, se compara el desempeño de los controladores híbridos PI+CI y reset-and-hold frente a un controlador PI clásico con anti-windup. Los resultados muestran que, en presencia de perturbaciones estocásticas asociadas a la nubosidad (las cuales afectan a la energía efectiva captada por el PDC), las estrategias híbridas mejoran el seguimiento de temperatura y reducen la persistencia del error respecto al control PI convencional.

Palabras clave: Control de temperatura, Control reseteado, PI+CI, Sistemas híbridos, Energía solar, Control estocástico

Hybrid temperature control in solar concentrators under stochastic solar irradiance

Abstract

We study the modeling and implementation of hybrid control strategies for temperature regulation in a solar-powered thermal plant using a parabolic solar concentrator (PDC). In particular, the performance of the hybrid PI+CI and reset-and-hold controllers is compared against that of a classical PI controller with anti-windup compensation. The results show that, in the presence of stochastic disturbances associated with cloudiness (which affect the effective energy captured by the PDC), the hybrid strategies improve temperature tracking and reduce error persistence with respect to the conventional PI controller.

Keywords: Temperature control, Reset control, PI+CI, Hybrid systems, Solar energy, Stochastic control

1. Introducción

La integración de tecnologías solares térmicas en procesos industriales constituye una alternativa prometedora para reducir el consumo energético fósil en aplicaciones de media temperatura Espinosa (2019). Entre estas tecnologías, los colectores de disco parabólico destacan por sus elevadas eficiencias ópticas y capacidad de concentración solar Espinosa (2019); Tzivanidis et al. (2015).

No obstante, el control de estos sistemas suele formularse bajo hipótesis idealizadas que ignoran perturbaciones relevantes, como la variabilidad estocástica de la irradiancia so-

lar (cuya dinámica podría en principio modelarse) y los retardos térmicos asociados al transporte del fluido caloportador (HTF). Estos efectos dificultan el mantenimiento de referencias térmicas constantes y degradan el rendimiento de estrategias clásicas de control.

En este trabajo se propone un modelo simplificado de una caldera solar compuesta por un colector de disco parabólico y un intercambiador de calor, incorporando una dinámica estocástica de irradiancia basada en Badosa et al. (2018); Iversen et al. (2014). El problema se plantea como uno de regulación térmica, donde el objetivo es mantener la temperatura del HTF

*Autor para correspondencia: aitor.molinat@um.es

alrededor de una referencia deseada mediante el desapuntamiento controlado de la parábola como variable manipulada. Finalmente, se comparan estrategias PI convencionales frente a esquemas híbridos PI+CI y PI+CI reset-and-hold Sáez (2024); Sáez et al. (2025); Mulero-Martínez et al. (2025); Sáez et al. (2022); Goebel et al. (2012); Baños and Barreiro (2012, 2022) bajo distintos escenarios de irradiancia y retardos térmicos.

Los resultados muestran que bajo condiciones de nubosidad media-alta, las estrategias de control híbrido presentan un mejor comportamiento en regulación estacionaria que el controlador PI convencional, reduciendo tanto el error acumulado como la sensibilidad frente a perturbaciones estocásticas en la irradiancia, que es justo lo deseable en problemas de regulación térmica.

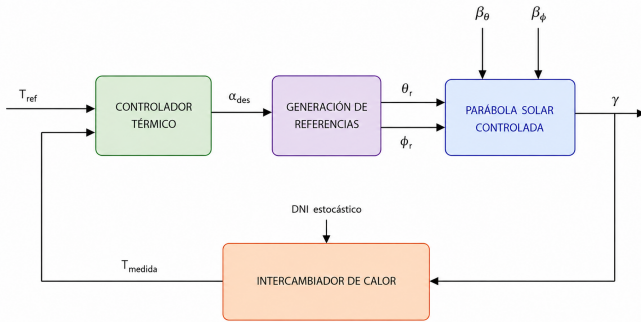


Figura 1: Diagrama de bloques del sistema

2. Descripción del sistema

El sistema que se estudia en el trabajo es una caldera solar compuesta por dos subsistemas principales: un colector de disco parabólico (PDC) y un intercambiador de calor. La arquitectura general del sistema se muestra en la Figura 1, a partir de la cual se extrae la estructura de flujo del problema. Comentamos a continuación en detalle cada parte.

2.1. Generación de referencias y parábola solar controlada

El bloque de generación de referencias proporciona la trayectoria solar a seguir mediante un algoritmo astronómico simplificado basado en NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration (2025); Meeus (1991). Dicha referencia queda definida por la elevación solar ϕ_{sol} y el azimuth θ_{sol} para una fecha y localización geográfica determinadas.

La parábola solar controlada modela el movimiento del colector en dichas coordenadas angulares (que constituyen el estado de la misma). En concreto, la dinámica angular de la parábola se representa mediante el modelo de primer orden:

$$\dot{\theta}(t) = Au_{\theta}(t) + \beta_{\theta}(t), \quad \beta_{\theta}(t) \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\theta}^2), \quad (1)$$

$$\dot{\phi}(t) = Bu_{\phi}(t) + \beta_{\phi}(t), \quad \beta_{\phi}(t) \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\phi}^2), \quad (2)$$

donde β_{θ} y β_{ϕ} representan perturbaciones estocásticas asociadas a pandeos estructurales, vibraciones mecánicas y efectos del viento. Los parámetros A, B corresponden a las constantes dinámicas de la planta, mientras que u_{θ} y u_{ϕ} representan las señales de control asociadas a los motores de actuación.

La salida de este subsistema determina el factor geométrico de apuntamiento γ . Sean $\vec{v}_{sol}$ y $\vec{v}_{par}$ los vectores unitarios asociados a la dirección solar y a la orientación de la parábola, respectivamente, parametrizados en coordenadas esféricas. El factor geométrico se define como:

$$\gamma(t) = \cos(\alpha) = \vec{v}_{sol} \cdot \vec{v}_{par}, \quad (3)$$

donde α representa el ángulo relativo entre ambas direcciones tal que en condiciones de apuntamiento perfecto se tiene $\gamma = 1$.

2.2. Intercambiador de calor

Se construye ahora un modelo de balance energético basado en el flujo de calor que capta el colector y las pérdidas al entorno por procesos varios. Nos inspiramos en el sistema que se describe en Espinosa (2019). Conviene tener en mente que el objetivo central es tener una temperatura dada en el HTF por la obtención de energía solar, luego es necesario un modelo apropiado de balance energético como el descrito en Espinosa (2019).

La potencia térmica captada por el colector depende tanto de la irradiancia directa normal (DNI, Direct Normal Irradiation) como del factor geométrico de apuntamiento γ . En concreto, el flujo de calor solar incidente se modela mediante:

$$\dot{Q}_{solar} = A_{ap}I(t)\gamma, \quad (4)$$

donde A_{ap} representa el área efectiva del colector e $I(t)$ la irradiancia directa normal medida en W/m^2 .

La potencia realmente absorbida por el sistema se corrige mediante un rendimiento óptico global asociado a la reflectividad y eficiencia del concentrador:

$$\dot{Q}_{abs} = \eta_o \rho_{conc} \dot{Q}_{solar}, \quad (5)$$

siendo η_o la eficiencia óptica global y ρ_{conc} la reflectividad del concentrador.

Además, se consideran pérdidas térmicas lineales hacia el entorno dadas por:

$$\dot{Q}_{loss} = L(T - T_{amb}), \quad (6)$$

donde L es el coeficiente global de pérdidas térmicas, T la temperatura del HTF y T_{amb} la temperatura ambiente (que en primera aproximación se considera constante), medidas en grados centígrados.

Además, el propio flujo del fluido extrae energía térmica del sistema, modelándose mediante:

$$\dot{Q}_{load} = \dot{m}c_p(T - T_{return}), \quad (7)$$

donde $\dot{m}$ es el caudal másico del HTF, c_p su calor específico y T_{return} la temperatura de retorno del circuito. Esta última se toma constante, en tanto que no se ve afectada por el propio proceso cuando pensamos en una configuración recirculada mediante circuito cerrado.

Con todo ello, el balance energético neto queda definido por:

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{abs} - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_{load}. \quad (8)$$

La dinámica térmica del sistema se aproxima mediante un modelo concentrado de primer orden:

$$M_{eq}C_p \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{net}, \quad (9)$$

donde M_{eq} representa la masa térmica equivalente (o inercia térmica) del sistema.

Sustituyendo las expresiones anteriores y reorganizando constantes, el modelo puede reescribirse en forma estándar como:

$$\tau \dot{T}(t) + T(t) = KI(t)\gamma + b, \quad (10)$$

La constante de tiempo térmica viene dada por:

$$\tau = \frac{M_{eq}C_p}{L + \dot{m}c_p}, \quad (11)$$

Además, $K = \frac{\eta_o \rho_{conc} A_{ap}}{L + \dot{m}c_p}$ y $b = \frac{LT_{amb} + \dot{m}c_p T_{return}}{L + \dot{m}c_p}$. Notar que, dada la constancia de T_{return} mencionada anteriormente, así como la constancia de T_{amb} , el parámetro b puede entenderse como una constante en este caso. Finalmente, la temperatura medida incorpora un retardo puro asociado al transporte del HTF desde el absorbedor hasta el punto de medida:

$$T_{med}(t) = T(t - \tau_r), \quad (12)$$

considerándose en este trabajo un retardo térmico de $\tau_r = 300$ s.

Resulta evidente que el objetivo del sistema consiste en captar únicamente la cantidad de irradiancia necesaria para mantener la temperatura del HTF alrededor de la referencia deseada T_{ref} . No obstante, este problema se ve fuertemente condicionado por la variabilidad atmosférica, ya que la irradiancia solar debe interpretarse como una perturbación externa de naturaleza estocástica y con dinámica propia. En consecuencia, las fluctuaciones de nubosidad introducen variaciones sobre la potencia térmica captada, dificultando la regulación térmica del sistema.

2.2.1. Irradiancia estocástica. Modelo de nubes

Inspirados en Badosa et al. (2018); Iversen et al. (2014), se dota a la irradiancia solar de una dinámica estocástica propia capaz de reproducir distintos escenarios de nubosidad y variabilidad atmosférica.

En primer lugar, se define un perfil de irradiancia ideal de cielo despejado $I_{clear}(t)$, construido mediante una ventana coseno que aproxima la evolución diaria típica de la DNI:

$$I_{clear}(t) = I_{max} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(\pi x) \right), \quad (13)$$

donde I_{max} representa la irradiancia máxima alcanzable y x es una variable adimensional dependiente de la hora solar.

A partir de dicho perfil ideal, la irradiancia real se modela mediante:

$$I(t) = I_{clear}(t)X(t), \quad (14)$$

donde $X(t) \in [0, 1]$ representa un índice estocástico de nubosidad (CSI, *Clear Sky Index*).

La dinámica temporal de $X(t)$ se describe mediante la ecuación diferencial estocástica:

$$dX = -a(X - X_f)dt + \sigma X^\alpha (1 - X)^\beta dW, \quad (15)$$

donde: (i) a controla la velocidad de convergencia hacia el valor esperado X_f , (ii) σ determina la intensidad de las fluctuaciones atmosféricas (nubosidad), (iii) dW representa un proceso de Wiener, (iv) α y β modulan la intensidad del ruido en función del nivel de nubosidad.

Este modelo permite reproducir fluctuaciones suaves en condiciones de cielo despejado y variaciones más agresivas en escenarios de nubosidad parcial, proporcionando perfiles de irradiancia realistas para la evaluación de las estrategias de control propuestas.

2.3. Controlador térmico

El objetivo del controlador térmico consiste en mantener la temperatura del fluido caloportador HTF alrededor de una referencia deseada T_{ref} . Para ello, se propone utilizar como variable manipulada un ángulo de desapuntamiento $\alpha_{des}(t)$, interpretado como la señal de control del sistema:

$$u(t) = \alpha_{des}(t). \quad (16)$$

La idea fundamental consiste en modificar indirectamente la potencia térmica absorbida por el colector mediante desviaciones respecto al apuntamiento solar ideal. De este modo, si la energía captada provoca un incremento excesivo de la temperatura del HTF, el controlador introduce un desapuntamiento de la parábola para reducir la irradiancia efectiva incidente sobre el absorbedor. Análogamente, cuando la temperatura disminuye por debajo de la referencia, el sistema reduce el desapuntamiento para aumentar la captación solar.

El ángulo de desapuntamiento modifica dinámicamente la referencia solar generada mediante el algoritmo NOAA, de modo que las referencias angulares quedan definidas por:

$$\theta_r(t) = \theta_{sol}(t), \quad \phi_r(t) = \phi_{sol}(t) - \alpha_{des}(t). \quad (17)$$

Obsérvese que el desapuntamiento actúa únicamente sobre la coordenada de elevación, dado que esta constituye el grado de libertad dominante en la reducción de la irradiancia efectiva captada por el colector.

Finalmente, la señal de control se encuentra saturada según:

$$0 \leq \alpha_{des}(t) \leq 70^\circ. \quad (18)$$

El objetivo de control considerado en este trabajo consiste en estabilizar la temperatura del fluido caloportador alrededor de una referencia estacionaria $T_{ref} = 150^\circ\text{C}$. En este contexto, el interés principal no reside en minimizar el transitorio inicial, sino en mantener condiciones térmicas aproximadamente constantes durante una determinada franja horaria de operación.

Motivados por trabajos previos donde los retardos térmicos desempeñan un papel determinante en el comportamiento dinámico del sistema Sáez (2024), se analizan tres estrategias de control distintas: un controlador PI clásico con anti-windup (PI+AW) por *clamping*, un controlador PI+CI y una estrategia PI+CI reset-and-hold (RH PI+CI) Sáez et al. (2022).

Las dos últimas estrategias pertenecen al ámbito de los sistemas híbridos Goebel et al. (2012) y han mostrado resultados satisfactorios en aplicaciones con dinámicas lentas y presencia de retardos, como fotobiorreactores Mulero-Martínez et al. (2025).

3. Control híbrido

3.1. Preliminares. Sistemas híbridos

Un sistema híbrido con estado continuo $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ y entrada $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^m$ puede representarse mediante Goebel et al. (2012):

$$\mathcal{H} : \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = F(\mathbf{x}, \mathbf{w}), & (\mathbf{x}, \mathbf{w}) \in C, \\ \mathbf{x}^+ = G(\mathbf{x}, \mathbf{w}), & (\mathbf{x}, \mathbf{w}) \in D, \end{cases} \quad (19)$$

donde C y D representan respectivamente los conjuntos de flujo y salto, mientras que F y G describen las dinámicas continuas y discretas del sistema.

Las señales híbridas φ se definen sobre un dominio híbrido $\text{dom } \varphi$, formado por la unión de intervalos $[t_j, t_{j+1}] \times \{j\}$, con $0 = t_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots$. Un arco híbrido $\mathbf{x} : \text{dom } \mathbf{x} \rightarrow \mathbb{R}^n$ es una señal híbrida tal que $\mathbf{x}(\cdot, j)$ es localmente absolutamente continua para cada j .

3.2. Controlador PI+CI

El controlador PI+CI constituye una estrategia híbrida basada en la combinación de un controlador PI convencional con un integrador reseteado tipo CI (*Clegg Integrator*) (se recomienda ir a Mulero-Martínez et al. (2025) para más detalles, pues allí está la teoría necesaria para reforzar el entendimiento de este trabajo). El controlador incorpora dos estados continuos $x_I, x_{CI} \in \mathbb{R}$, asociados respectivamente a la acción integral clásica y a la acción integral reseteada. Asimismo, se introduce una variable discreta $q \in \{1, -1\}$ encargada de definir la lógica de reseteo.

La dinámica híbrida del controlador viene dada por:

$$PI + CI : \begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{x}_{CI} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} e, & (x_I, x_{CI}, q, \sigma) \in C, \\ \begin{pmatrix} x_I^+ \\ x_{CI}^+ \\ q^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_I \\ 0 \\ -q \end{pmatrix}, & (x_I, x_{CI}, q, \sigma) \in D. \end{cases} \quad (20)$$

donde C y D representan los conjuntos de flujo y salto, respectivamente.

La señal de control asociada se calcula como:

$$u = K_p e + \frac{K_p}{\tau_I} ((1 - p_r)x_I + p_r x_{CI}), \quad (21)$$

siendo K_p la ganancia proporcional, τ_I la constante integral y p_r el parámetro de reinicio.

Durante la evolución continua y antes de producirse el primer salto híbrido, se verifica $x_I = x_{CI}$, recuperándose exactamente el comportamiento de un controlador PI convencional. Tras cada acción de reset (descrito por la superficie de reset σ que es en general una función del error y ayuda a detectar cruces por cero del mismo $\sigma = S(e)$), el parámetro p_r regula la contribución relativa entre la acción integral clásica y la acción integral reseteada.

3.3. Reset-and-hold para sistemas SISO

La estrategia *reset-and-hold* Sáez (2024); Baños and Barreiro (2022); Sáez et al. (2025) introduce una dinámica híbrida adicional destinada a mejorar el comportamiento de los controladores reset en presencia de retardos. La idea fundamental consiste en mantener constante la salida del controlador durante un intervalo temporal τ_H tras cada acción de reset, desacoplando temporalmente la retroalimentación y evitando oscilaciones indeseadas.

El controlador alterna entre dos modos de funcionamiento: (i) Modo reset ($m = 1$): el controlador evoluciona normalmente y se permiten acciones de reset. (ii) Modo hold ($m = 0$): tras cada acción de reset, la salida del controlador permanece constante durante un intervalo temporal τ_H .

Formalmente, el controlador reset-and-hold asociado al PI+CI puede modelarse como:

$$R_H : \begin{cases} \dot{x}_r = (mA_r + (1 - m)A'_r)x_r + mB_r e, \\ \dot{\tau} = 1, & (x_r, m, \tau, e) \in C_H, \\ x_r^+ = A_p x_r, \\ m^+ = 1 - m, & \tau^+ = 0, \quad (x_r, m, \tau, e) \in D_H, \end{cases} \quad (22)$$

donde $x_r = [x_I \ x_{CI}]^T$ representa el estado interno del controlador PI+CI, $m \in \{0, 1\}$ la variable lógica asociada al modo de funcionamiento y τ un temporizador encargado de regular el intervalo de holding.

Los conjuntos de flujo y salto vienen dados por:

$$C_H = C_{H0} \cup C_{H1}, \quad D_H = D_{H0} \cup D_{H1}, \quad (23)$$

con:

$$C_{H0} = \{(x_r, m, \tau, e) : m = 0, \tau \leq \tau_H\}, \quad (24)$$

$$C_{H1} = \{(x_r, m, \tau, e) : m = 1, q\sigma \geq 0\}, \quad (25)$$

$$D_{H0} = \{(x_r, m, \tau, e) : m = 0, \tau \geq \tau_H\}, \quad (26)$$

$$D_{H1} = \{(x_r, m, \tau, e) : m = 1, q\sigma \leq 0\}. \quad (27)$$

La estrategia reset-and-hold permite así desacoplar temporalmente la retroalimentación tras cada salto híbrido, mitigando los efectos adversos producidos por el retardo térmico de la planta.

Nótese además que en el caso en que $\tau_H = 0$ la estrategia reset-and-hold se reduce al PI+CI.

4. Controlador térmico para la caldera solar

Para el controlador térmico externo se comparan tres estrategias: PI+anti-windup, PI+CI y PI+CI reset-and-hold. En los tres casos, la señal de control es el ángulo de desapuntamiento α_{des} y el objetivo es regular la temperatura medida del HTF alrededor de $T_{ref} = 150^\circ\text{C}$. El control de la parábola solar es idéntico en las tres estrategias (un PI ajustado con SIMC con ganancias $K_{p,\theta} = K_{p,\phi} = 1,0$ y $K_{i,\theta} = K_{i,\phi} = 0,0025$).

El controlador PI convencional se sintoniza inicialmente mediante reglas SIMC para una planta térmica de primer orden con retardo (que de la ecuación (11) y en este caso, es de $\tau \approx 97,6$ s). Dado que la sintonía SIMC resulta agresiva para el sistema considerado, se realiza posteriormente un ajuste fino en simulación. Las ganancias finales del PI térmico son:

$$K_{p,T} = 1,0, \quad K_{i,T} = 0,01. \quad (28)$$

Se añade además un anti-windup por clamping. Para la estrategia PI+CI se parte de la misma estructura proporcional-integral, incorporando una acción integral reseteada. En este caso se emplean unas ganancias ligeramente menos agresivas:

$$K_{p,T} = 0,7, \quad K_{i,T} = 0,009. \quad (29)$$

Inspirados en Mulero-Martínez et al. (2025), el coeficiente de reinicio se hace depender de la irradiancia efectiva, de modo que:

$$p_r(t) = \begin{cases} 0, & I(t) \leq I_{\min}, \\ 1 - \frac{I(t)}{I_{ref}}, & I(t) > I_{\min}, \end{cases} \quad (30)$$

donde I_{ref} representa la irradiancia nominal $I_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$ e $I_{\min}$ un umbral mínimo de irradiancia útil. En concreto, se toma $I_{\min} = 1 \text{ W/m}^2$.

Finalmente, la estrategia PI+CI reset-and-hold utiliza la misma ley adaptativa para $p_r(t)$, pero incorpora un tiempo de mantenimiento tras cada acción de reset. Las ganancias empleadas son:

$$K_{p,T} = 0,7, \quad K_{i,T} = 0,01, \quad \tau_H = \tau_r/3 = 100 \text{ s}. \quad (31)$$

Nótese que el controlador PI+CI puede interpretarse como el caso particular de la estrategia reset-and-hold cuando $\tau_H = 0$. En cuanto a la superficie de reset σ , esta se toma como:

$$\sigma = S(e) = e_T + \tau_r \dot{e}_T, \quad (32)$$

siendo $\tau_r = 300$ segundos, tanto en el PI+CI como en el RH PI+CI.

5. Casos de estudio

Dado que el modelo que motiva el trabajo es el descrito en Espinosa (2019), se toman los parámetros allí descritos, salvo modificaciones introducidas por simplicidad en el modelo empleado en este trabajo. En concreto, el área de apertura del colector se fija en $A_{ap} = 15,9 \text{ m}^2$, mientras que la reflectividad del concentrador y la eficiencia óptica global se toman respectivamente como $\rho_{conc} = 0,86$ y $\eta_o = 0,93$.

Por otro lado, el coeficiente global de pérdidas térmicas se considera $L = 10,79 \text{ W/K}$, con una temperatura ambiente fija de $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ y una temperatura de retorno del circuito dada por $T_{return} = 140^\circ\text{C}$. El fluido HTF se modela mediante un calor específico constante $c_p = 2200 \text{ J/(kg K)}$. Se emplea un caudal másico $\dot{m} = 0,2 \text{ kg/s}$. La masa térmica equivalente del sistema se fija en $M_{eq} = 20 \text{ kg}$, lo que conduce a una capacidad térmica equivalente $M_{eq}c_p = 44000 \text{ J/K}$.

En cuanto a la dinámica angular de la parábola, dada por (1) y (2), se toman $A = B = 0,01$, considerando perturbaciones gaussianas sobre ambas coordenadas con $\sigma_\theta = \sigma_\phi = 0,1$.

Finalmente, para el modelo estocástico de irradiancia se utilizan los parámetros $a = 0,75$, $\alpha = 0,8$ y $\beta = 0,7$, analizando distintos escenarios de nubosidad mediante variaciones del parámetro de ruido σ .

Estudiamos el desempeño de las estrategias de control propuestas (PI, PI+CI, reset-and-hold PI+CI) para tres escenarios de nubosidad distintos. En concreto, se toma un escenario de cielo ideal $\sigma = 0$ (cielo claro), otro de nubosidad moderada $\sigma = 0,2$ y otro de nubosidad media alta $\sigma = 0,4$.

Simulamos un control entre las 10:00 h y las 17:00 h del día 16 de marzo de 2026, en las coordenadas geográficas correspondientes al Edificio Rector Soler de la Universidad de Murcia, que es donde se ubica la plataforma real de Espinosa (2019). Como métricas de rendimiento, se evalúan el IAE y el ITAE normalizados desde las 12 de la mañana en adelante, dado que el objetivo es obtener un estacionario satisfactorio en una franja horaria concreta, despreciando el transitorio inicial. Los resultados se muestran en las Tablas 1 y 2. De ellas se extrae una conclusión evidente: las estrategias de control híbrido mejoran progresivamente las métricas de rendimiento conforme el escenario de nubosidad se vuelve más crítico. Es decir, el efecto de reset y la incorporación de estrategias diseñadas específicamente para paliar los efectos del retardo permiten mejorar notablemente el seguimiento respecto a estrategias clásicas de control (PI), alcanzándose mejoras de hasta un 17,61 % en el IAE y de un 10,27 % en el ITAE.

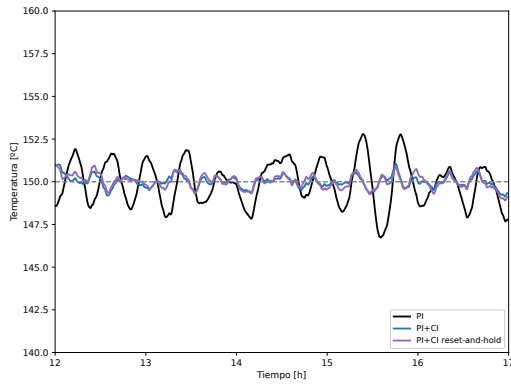
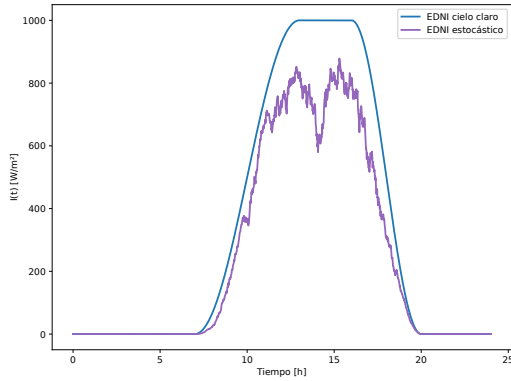
Adicionalmente, en la Figura 2 se muestra el seguimiento de referencia en temperatura para los tres controladores bajo la condición de nubosidad $\sigma = 0,4$. Allí se observa cómo el comportamiento estacionario es considerablemente mejor para las estrategias híbridas, rechazando de forma más efectiva la perturbación estocástica inducida por la nubosidad que el PI convencional, lo cual resulta especialmente deseable en tareas de mantenimiento de temperaturas aproximadamente constantes. Se muestra también el perfil de irradiancia correspondiente $I(t)$ en la Figura 3. Finalmente, en la Figura 4 se representa la señal de control generada por los tres controladores, observándose cómo las estrategias híbridas proponen variaciones más suaves y menos agresivas en el ángulo de desapuntamiento que el PI clásico.

Tabla 1: IAE normalizado (desde las 12 h) para distintos niveles de nubosidad.

σ	Controlador	IAE [$^\circ\text{C}$]	Mejora vs PI
0	PI+AW	32.811	—
	PI+CI	30.875	5.90 %
	RH PI+CI	30.433	7.25 %
0.2	PI+AW	34.791	—
	PI+CI	31.264	10.14 %
	RH PI+CI	31.617	9.12 %
0.4	PI+AW	41.197	—
	PI+CI	33.941	17.61 %
	RH PI+CI	34.443	16.39 %

Tabla 2: ITAE normalizado (desde las 12 h) para distintos niveles de nubosidad.

σ	Controlador	ITAE [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$]	Mejora vs PI
0	PI+AW	297.953	—
	PI+CI	282.015	5.35 %
	RH PI+CI	280.332	5.91 %
0.2	PI+AW	306.821	—
	PI+CI	287.051	6.44 %
	RH PI+CI	290.308	5.38 %
0.4	PI+AW	342.555	—
	PI+CI	307.361	10.27 %
	RH PI+CI	309.906	9.53 %

Figura 2: Seguimiento de referencia en temperatura para $\sigma = 0.4$. La curva negra corresponde al PI+AW, la azul al PI+CI y la morada al RH PI+CIFigura 3: Irradiancia $I(t)$ en cielo claro y estocástica para $\sigma = 0.4$. La curva azul corresponde a la irradiancia sin nubes (cielo claro) y la morada a la irradiancia estocástica

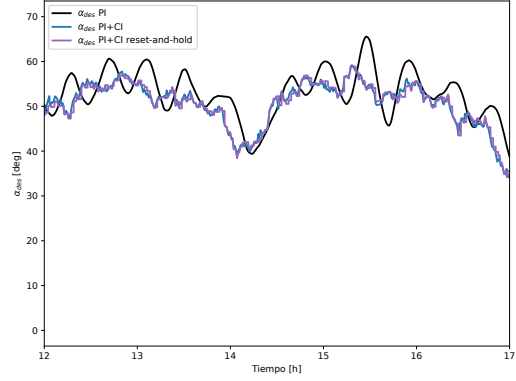
6. Conclusiones

Se ha presentado un modelo simplificado de una caldera solar con irradiancia estocástica y retardos térmicos asociados al transporte del HTF. Sobre dicho modelo se han comparado distintas estrategias de control para regulación estacionaria de temperatura mediante desapuntamiento solar.

Los resultados muestran que las estrategias híbridas PI+CI y reset-and-hold mejoran el comportamiento estacionario res-

pecto a un PI convencional, especialmente bajo condiciones de nubosidad media-alta.

Como trabajo futuro, resultaría de interés ampliar la comparación con estrategias clásicas de control, incorporando esquemas PI+AW con predictores, dado el papel determinante que desempeña el retardo en este tipo de sistemas.

Figura 4: Señal de control (ángulo de desenfoque) para $\sigma = 0.4$. La curva negra corresponde al PI+AW, la azul al PI+CI y la morada al RH PI+CI

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo de los proyectos PID2020-112709RB-C22 y PID2023-149066NB-I00, financiados por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033.

Referencias

- Badosa, J., Gobet, E., Grangereau, M., Kim, D., 2018. Day-ahead probabilistic forecast of solar irradiance: a stochastic differential equation approach. In: Renewable Energy: Forecasting and Risk Management. Springer, pp. 73–93.
- Baños, A., Barreiro, A., 2012. Reset Control Systems. Springer, London.
- Baños, A., Barreiro, A., 2022. Reset control systems: the zero-crossing resetting law. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems 46, 101259.
- Espinosa, O. L., 2019. Analysis of a solar heating industrial plant based on a parabolic dish collector. Ph.D. thesis, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Spain.
- Goebel, R., Sanfelice, R. G., Teel, A. R., 2012. Hybrid Dynamical Systems: Modeling, Stability, and Robustness. Princeton University Press, Princeton.
- Iversen, E. B., Morales, J. M., Møller, J. K., Madsen, H., 2014. Probabilistic forecasts of solar irradiance by stochastic differential equations. Environmental metrics 25 (3), 152–164.
- Meeus, J., 1991. Astronomical Algorithms. Willmann-Bell, Richmond.
- Mulero-Martínez, J. I., Baños, A., Guzmán, J. L., Moreno, J. C., 2025. Control híbrido basado en perturbaciones medibles para un fotobiorreactor industrial tipo raceway. Jornadas de Automática 46.
- National Oceanic and Atmospheric Administration, 2025. NOAA solar calculation details. <https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/calcdetails.html>.
- Sáez, J. F., 2024. Hybrid reset control strategies for systems with time delays. Ph.D. thesis, Universidad de Murcia, Murcia, Spain.
- Sáez, J. F., Baños, A., Arenas, A., 2022. Reset-and-hold control of systems with time delay. IEEE Access 10, 101803–101813.
- Sáez, J. F., Baños, A., Arenas, A., 2025. Hybrid control of miso systems with delays. ISA Transactions 161, 216–227.
- Tzivanidis, C., Bellos, E., Korres, D., Antonopoulos, K. A., Mitsopoulos, G., 2015. Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector. Case Studies in Thermal Engineering 6, 226–237.