

Estrategia de control selectivo de temperatura y humedad para un invernadero solar chino con un enfoque basado en eventos

Ran Liu^a, José Luis Guzmán^{a, *}, Francisco García-Mañas^a, Ming Li^b

^aDepartamento de Informática, ceiA3, CIESOL, Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, La Cañada de San Urbano, Almería, España.

^bInformation Technology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences/ National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture/ National Engineering Laboratory for Agri-product Quality Traceability/ Meteorological Service Center for Urban Agriculture, China Meteorological Administration- Ministry of Agriculture and Rural Affairs/ Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, Beijing, China

To cite this article: Liu, R., Guzmán, J.L., García-Mañas, F., Li, M., 2023. Selective temperature and humidity control strategy for a chinese solar greenhouse with an event-based approach. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 20, 150-161. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.18119>

Resumen

Este artículo presenta la aplicación de un esquema de control selectivo de temperatura y humedad para invernaderos solares chinos, que son los más utilizados en las provincias del norte de China. En primer lugar, para controlar la temperatura, se propone un controlador PI con un enfoque basado en eventos. Tras la evaluación de varios valores de la banda de ocurrencia de eventos, se obtiene una solución que permite reducir en un 43,8 % el número de aperturas y cierres de las ventanas del invernadero, mientras que el error de temperatura se incrementa sólo en un 1,13 %. En segundo lugar, se ha diseñado un controlador para la humedad relativa y otro para la humedad absoluta. Los resultados muestran que el control de humedad relativa funciona adecuadamente cuando la consigna no es demasiado elevada. Sin embargo, la acción de control se deteriora cuando la consigna es superior al 70 %. En comparación, el control de humedad absoluta permite regular la humedad para referencias de cualquier valor, pero la precisión de control es menor. Finalmente, mediante un estudio en simulación, se demuestra la efectividad de la estrategia de control selectivo de temperatura con un esquema que da prioridad para controlar la humedad cuando ésta alcanza límites no deseados. Esta estrategia de control consigue mantener la humedad relativa por debajo del 80 % mientras que controla la temperatura en la consigna establecida, evitando así que la alta humedad dañe al cultivo.

Palabras clave: Control selectivo, Control PI, Control basado en eventos, Agricultura, Invernaderos.

Selective temperature and humidity control strategy for a chinese solar greenhouse with an event-based approach

Abstract

This paper introduces an application of a selective temperature and humidity control scheme for chinese solar greenhouses, which are the most widely used in the northern provinces of China. Firstly, a PI controller for temperature is studied with an event-based approach. After the evaluation of different event-generator thresholds, an optimum value is selected which significantly reduces the number of vent movements by 43.8%, while only increasing the temperature error by 1.13%. Secondly, a controller for relative humidity and another controller for absolute humidity were implemented. The results show that the controller for relative humidity performs adequately when the set-point is not high. However, the control action is deteriorated when the set-point is over 70%. The absolute humidity control allows to regulate the humidity for references of any value, but with less control precision. Finally, through a simulation study, the effectiveness is demonstrated for a selective temperature control strategy with a humidity priority control scheme. This control strategy keeps the relative humidity below 80% while controlling the temperature to the set-point, preventing high humidity from damaging the crop.

Keywords: Selective control, PI control, Event-based control, Agriculture, Greenhouses.

*Autor para correspondencia: joguzman@ual.es (Guzmán, J.L.);

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

1. Introducción

En los últimos años, con el crecimiento anual de la población mundial, el aseguramiento del suministro de alimentos ha recibido una atención cada vez mayor. La agricultura protegida es considerada como una de las soluciones por su alta productividad y aprovechamiento de los terrenos de cultivo. Según las últimas estadísticas, la superficie de invernaderos a nivel mundial se estima en 3,64 millones de hectáreas (Guo et al., 2021). En concreto, el área de cultivo en invernaderos en China se ha acercado a los 2 millones de hectáreas y, entre ellos, aproximadamente, 1,2 millones hectáreas están dedicadas a invernaderos de túnel de plástico, mientras que el área ocupada por los invernaderos solares chinos (*chinese solar greenhouses*, CSG) es de 0,6 millones de hectáreas (Wang et al., 2017).

Los CSG garantizan el suministro de hortalizas en las provincias del norte de China. A diferencia de los invernaderos tradicionales utilizados en el área del Mediterráneo, los CSG están diseñados para mejorar la utilización de la energía solar y minimizar las pérdidas térmicas, siendo esto último lo más importante. En las regiones del norte de China, la temperatura nocturna en invierno es inferior a 0°C y la mayoría de los agricultores prefieren cubrir el techo transparente con una manta de aislamiento térmico, en lugar de quemar recursos energéticos para calefacción. Por tanto, debido a los factores geográficos y climáticos, la mayor diferencia entre los CSG y otros tipos de invernadero es el techo transparente en forma de abanico con una sola pendiente (véase la Figura 1). Destacar que esta estructura de invernadero da lugar a la obtención de gradientes muy elevados en las condiciones climáticas internas frente a cambios en las señales de control, siendo una de las principales diferencias dinámicas con respecto a invernaderos de la zona del Mediterráneo.



Figura 1: Invernadero solar en Pekín, China.

Actualmente, existen pocos estudios sobre la aplicación de técnicas de control automático en los CSG, como se resume a continuación. Wang y Zhang (2018) utilizaron un método de control adaptativo basado en lógica difusa para mantener la temperatura de un invernadero solar. Li et al. (2017) estudiaron un esquema de dos niveles con evaluación de riesgos para un uso óptimo de la energía solar en el invernadero. Xu et al. (2018a,b) presentaron un control óptimo y adaptativo, con dos escalas de tiempo y con horizonte deslizante aplicado al cultivo de lechuga en CSG.

Aparte de los citados trabajos, no se han reportado más estudios relevantes hasta el momento, y, particularmente, tampoco se ha estudiado el uso de controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para la regulación del clima dentro de los

CSG. En la mayoría de las explotaciones comerciales, los agricultores confían en el control manual. En algunas instalaciones demostrativas de CSG, sí se suelen incorporar controladores convencionales para la regulación de consignas. No obstante, el control PID para regular la temperatura en el interior de los invernaderos ha sido ampliamente estudiado para invernaderos ubicados en otros lugares, como en Almería (Beschi et al., 2014; García-Mañas et al., 2021; Montoya-Ríos et al., 2020). Además, se han propuesto otros métodos de control, como el control basado en eventos, para disminuir el esfuerzo energético requerido para regular variables de interés (Pawlowski et al., 2016).

Los controladores PID requieren que los actuadores del invernadero respondan de manera continua y frecuente para mantener las variables climáticas controladas alrededor de una consigna, buscando reducir el error de control. Sin embargo, mantener la consigna regulada con una precisión de menos de $0,1^{\circ}\text{C}$ para el error de control podría provocar un mayor uso de los actuadores y un gasto excesivo en la energía que consumen. En este sentido, los esquemas de control basado en eventos reducen la actuación del sistema de control, reaccionando sólo cuando es estrictamente necesario, es decir, cuando el error de control se considera lo suficientemente grande. Por ejemplo, en comparación con el control PID clásico, Pawlowski et al. (2016) demostraron que si el número de actuaciones de un controlador basado en eventos para un invernadero tipo Almería se reduce en un 34 %, el error aumenta sólo en un 1 %; si el número de eventos se reduce en un 83 %, el error aumenta en un 19,8 %. Por lo tanto, este enfoque es una contribución importante para promover una producción agrícola más limpia, reduciendo el gasto de recursos.

En la literatura, la mayor parte de la investigación actual se dedica al control de la temperatura en invernaderos. Pocos trabajos consideran el control de la humedad, que es crucial para las funciones fisiológicas de muchos cultivos. Una humedad relativa alta reduce el número de semillas y, por lo tanto, tiene un efecto negativo en la polinización (Smit, 2005). Una humedad relativa demasiado baja (diferencia de presión de vapor alta) provoca estrés hídrico en la planta (Körner y Challa, 2003). La humedad de las hojas, causada por una humedad relativa alta y mantenida en el tiempo, daña los cultivos debido a diversas enfermedades fúngicas, como, por ejemplo, mildiú vellosa, *Botrytis* y oídio (Liu et al., 2022). Rodríguez et al. (2008) presentaron un esquema de control de la humedad de un invernadero modificando las consignas de temperatura en función de la prioridad dada a la humedad relativa. La humedad relativa se controla mediante un límite superior e inferior dado, es decir, cuando la humedad está por encima de ese límite, la apertura de ventilación aumenta, y viceversa.

Pocas investigaciones previas presentan controladores PID específicos para invernadero, para humedad diurna y nocturna, así como temperatura, asegurando que el desempeño sea bueno para ambas variables. Un gran desafío de este problema es que la respuesta de la humedad es complicada y no lineal. Al aumentar la apertura de la ventilación del invernadero, la temperatura y el contenido de vapor de agua disminuyen simultáneamente, lo que tiene efectos y correlaciones respectivamente opuestos con la humedad relativa. Por lo tanto, en este trabajo se desarrollan y comparan dos métodos de control de la humedad.

El primero de ellos consiste en controlar directamente la humedad relativa en el interior del invernadero, pero el rendimiento no es el deseable, como se discute en la sección de resultados. El otro método consiste en adoptar una referencia dinámica de humedad absoluta, que depende de la temperatura en cada instante de tiempo y de una consigna fija para la humedad relativa. Este método se aplica por primera vez a invernaderos en este trabajo y los resultados obtenidos demuestran que puede ser una posible solución para controlar la humedad. En resumen, en este estudio se presenta un controlador PI basado en eventos, con un esquema de control selectivo aplicado para regular la temperatura y la humedad en un invernadero solar chino. Las principales contribuciones de este trabajo son las siguientes:

1. El control PI para la temperatura y la humedad se estudia por primera vez para invernaderos solares chinos.
2. El método de control basado en eventos reduce significativamente el número de eventos, es decir, el número de veces que los motores de las ventanas se accionan, lo que permite ahorrar energía y favorecer así una producción de cultivo más sostenible.
3. Se estudia en simulación una estrategia de control selectivo de temperatura y humedad con enfoque basado en eventos.

2. Materiales y métodos

En esta sección se describe el invernadero solar, la recopilación de datos, el modelado del invernadero y el diseño de los controladores para la temperatura y la humedad. Además, se expone el método de control basado en eventos y se presenta el esquema de control selectivo de temperatura y humedad.

2.1. Descripción del invernadero solar

El invernadero utilizado en este estudio es un invernadero solar chino, de estructura típica, con pendiente en forma de abanico (véase la Figura 1). Tiene 50 m de largo, 7 m de ancho, con una altura de cumbre de 3,5 m, como se muestra en la Figura 2. El lateral orientado al norte es un muro de ladrillo de 0,6 m de espesor, y el techo (orientado al sur) está cubierto con una película de polietileno (PE) transparente. El suelo del invernadero está situado 0,5 m por debajo del nivel del suelo exterior para aumentar el aislamiento térmico. En primavera y otoño, se cultivan pepinos colocados en filas. Las tuberías de riego por goteo están enterradas en el suelo y cubiertas con una película de plástico transparente.

La ventilación natural se efectúa mediante actuadores encargados de enrollar la película de PE en las ventanas superior e inferior. El área máxima de apertura de las ventanas es de 30 m² (50 m × 0,6 m).

2.2. Datos experimentales

Los datos experimentales para este trabajo proceden de dos estaciones de medida instaladas en el invernadero anteriormente descrito. El periodo de los datos seleccionados es del 15 al 28 de abril de 2021.

En el exterior, una estación meteorológica Davis Vantage Pro & Plus (Davis Instruments, Hayward, EE.UU.) se encarga de medir los datos meteorológicos cada 15 minutos: radiación solar (con rango 0 a 1800 W·m⁻²; precisión ±5%), velocidad y dirección del viento (con rango 0 a 67 m·s⁻¹; precisión ±5%), temperatura del aire (con rango -40 a +65 °C; precisión, ±0,5 °C y humedad relativa (con rango 0 a 100%; precisión, ±3%). En el centro del invernadero se encuentra una estación meteorológica Davis-6162 (Davis Instruments, Hayward, EE.UU.) para medir la temperatura y humedad relativa del aire, y la temperatura del suelo a 0,5 m de profundidad.

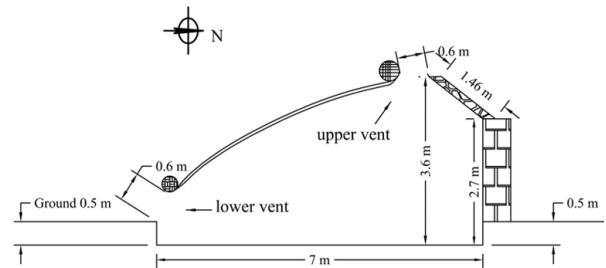


Figura 2: Estructura del invernadero experimental.

La altura del cultivo y el índice de área foliar (*leaf area index*, LAI) se midieron manualmente en cinco puntos equidistantes en la diagonal en el plano horizontal del invernadero, tomando cuatro plantas por cada punto de medida.

2.3. Modelo del invernadero

En un estudio anterior (Liu et al., 2021), se diseñó, calibró y validó un modelo para el invernadero empleado en este trabajo. Se trata de un modelo dinámico, totalmente validado para simular la temperatura y la humedad del invernadero solar chino. Para ejecutar el modelo, se deben especificar las condiciones iniciales y las correspondientes condiciones de contorno transitorias (datos meteorológicos). El modelo es un conjunto de expresiones que representan transferencias de energía y balances de masa aire-vapor. Para el cálculo de la evolución de la temperatura del aire en el tiempo, t , se emplea la siguiente expresión:

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{q_v(t) + q_{lea}(t) + q_c(t) + q_{liq}(t) + q_p(t)}{\rho \cdot V \cdot (c_p + c_{pw} \cdot h(t))} \quad (1)$$

donde los términos $q(t)$ (W) representan transferencias térmicas: $q_v(t)$ por efecto de la ventilación, $q_{lea}(t)$ por pérdidas de aire a través de la cubierta, $q_c(t)$ por convección, $q_{liq}(t)$ por condensación del vapor de agua, y $q_p(t)$ por la transpiración del cultivo. La humedad absoluta se representa como $h(t)$ (kg·kg⁻¹), ρ (kg·m⁻³) es la densidad del aire, c_p (kg⁻¹·K⁻¹) es el calor específico del aire, c_{pw} (J·kg⁻¹·K⁻¹) es el calor específico del vapor de agua, T es la temperatura interior (K) y V (m³) es el volumen del invernadero. Para calcular la humedad en el invernadero, se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{dh(t)}{dt} = s_v(t) + s_{lea}(t) + s_p(t) \quad (2)$$

donde los términos $s(t)$ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) representan intercambios de masa aire-vapor: $s_v(t)$ por la ventilación, $s_{lea}(t)$ por pérdidas a través de la cubierta, y $s_p(t)$ por la transpiración del cultivo.

Cada uno de los términos que componen (1) y (2) se calculan a partir de un grupo de ecuaciones que son, en su mayoría, fuertemente no lineales. Por lo tanto, resulta complicado calcular un controlador usando este modelo. No obstante, es importante destacar que este modelo no lineal se utiliza como simulador del invernadero real en este trabajo.

2.4. Modelo lineal

Una forma sencilla de obtener un modelo lineal del invernadero es mediante el uso de polinomios que relacionen la salida con la entrada del sistema. Por ejemplo, utilizando técnicas de identificación de sistemas y haciendo uso del System Identification Toolbox de MATLAB es posible construir este tipo de modelos dinámicos a partir de datos experimentales.

Para este trabajo, utilizando el modelo no lineal descrito en el apartado anterior, se han aplicado una serie de señales de entrada como cambios aleatorios en la apertura de la ventilación del invernadero, generadas intencionadamente para provocar respuestas pronunciadas en la temperatura y la humedad relativa. El resto de entradas al modelo no lineal son datos meteorológicos reales. A partir de las respuestas de temperatura y humedad obtenidas, se realiza el procedimiento clásico de identificación de sistemas para determinar modelos polinómicos autoregresivos con entradas exógenas (*Auto Regressive with eXogenous inputs*, ARX) (Montoya-Ríos et al., 2020; García-Mañás et al., 2021).

Se han obtenido 14 modelos ARX, uno para cada día de las dos semanas de datos disponibles. Finalmente, se seleccionaron dos modelos (uno de la primera semana y otro de la segunda) para los días que mejor ajuste ofrecieron según la siguiente expresión:

$$FIT = \left(1 - \frac{\|Y - \hat{Y}\|}{\|Y - \bar{Y}\|}\right) \cdot 100 \quad (3)$$

donde Y son los datos medidos de la variable a modelar, e \hat{Y} es la salida estimada por el modelo ARX. A partir de estos modelos lineales basados en datos, resulta más sencillo el cálculo de un controlador, como se expone en los siguientes apartados.

2.4.1. Modelo lineal de temperatura

Las ventanas del invernadero suelen mantenerse cerradas durante la noche, dado que la temperatura desciende por debajo de la consigna establecida. Por tanto, al considerar que la ventilación natural sólo actúa durante el día, para calcular un modelo ARX, se introducen cambios en la apertura de la ventilación durante el periodo diurno.

La Figura 3 muestra el esquema del modelo ARX que se obtiene al considerar como salida la temperatura del invernadero y como entrada la apertura de la ventilación natural. Se consideran como perturbaciones: la temperatura del aire exterior, la radiación solar y la velocidad del viento. La ecuación del modelo ARX en tiempo discreto, k , es la siguiente:

$$y(k) = \frac{B_1(z)}{A(z)}u(k) + \frac{B_2(z)}{A(z)}v_1(k) + \frac{B_3(z)}{A(z)}v_2(k) + \frac{B_4(z)}{A(z)}v_3(k) \quad (4)$$

donde y ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura, u (%) es la apertura de la ventilación, v_1 ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura exterior, v_2 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) es la radiación solar exterior, y v_3 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) es la velocidad del viento en el exterior.

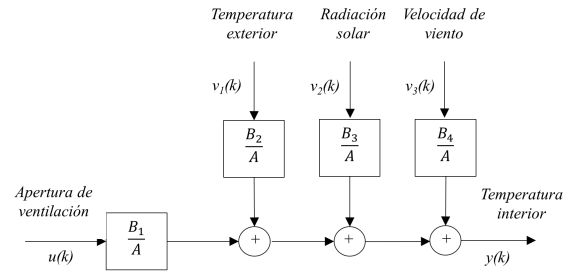


Figura 3: Esquema del modelo ARX que relaciona la temperatura del aire interior del invernadero con la apertura de la ventilación y con las perturbaciones.

2.4.2. Modelo lineal de humedad

Dado que en el presente trabajo se han comparado dos métodos para controlar la humedad, ha sido necesario calcular dos modelos ARX para dicha variable. Para el primer método, que consiste en controlar directamente la humedad relativa con la apertura de las ventilaciones, se han determinado modelos ARX para la humedad relativa diurna y nocturna, según el esquema de la Figura 4a.

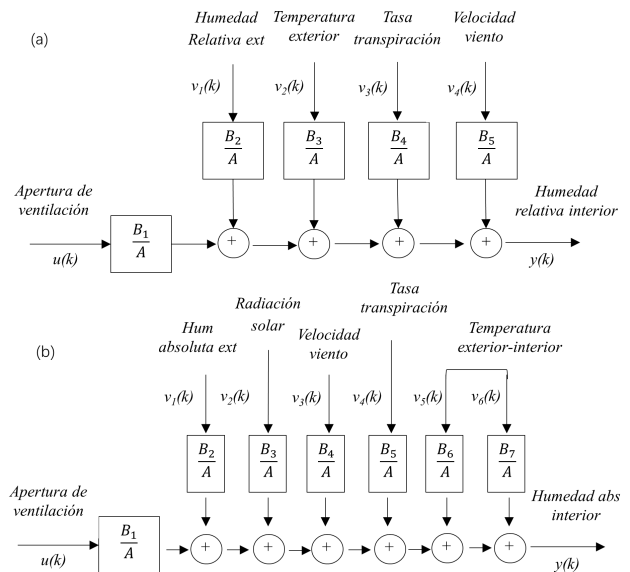


Figura 4: Esquemas de los modelos ARX que relacionan la humedad del aire interior del invernadero con la apertura de la ventilación y con las perturbaciones: (a) para la humedad relativa, (b) para la humedad absoluta.

Para el segundo método, que consiste en seguir una referencia cambiante de humedad absoluta, la salida del modelo ARX es la humedad absoluta (véase la Figura 4b) como cuantificación del contenido de vapor de agua en el invernadero, lo que está significativamente correlacionado con el intercambio climático interno-externo, la radiación y las funciones fisiológicas del cultivo. Como se aprecia en la Figura 4, las estructuras son similares, teniendo el segundo modelo más términos.

2.5. Cálculo de las funciones de transferencia y de los controladores PID

Una vez obtenidos los modelos alto orden tipo ARX, dichos modelos son simplificados con fines de control como funciones de transferencia de primera orden:

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-t_r s} \quad (5)$$

donde k es la ganancia estática, τ es la constante de tiempo, y t_r es el tiempo de retardo.

Para la simplificación de los modelos ARX, se han seguido las etapas y procedimientos expuestos por Montoya-Ríos et al. (2020) y García-Mañas et al. (2021). La idea principal se basa en aplicar un escalón de entrada a un modelo ARX y estudiar la respuesta en la salida para identificar un modelo mediante una función de transferencia de primer orden, para temperatura y para la humedad, respectivamente.

Los lazos de control se han diseñado mediante controladores PI para calcular la apertura de las ventanas en función del error existente entre la temperatura del invernadero (o la humedad) y el valor indicado como consigna (Montoya-Ríos et al., 2020). De esta forma, la ley de control vendrá dada por la siguiente expresión:

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{T_i} \int e(t) dt \quad (6)$$

siendo k_p la ganancia proporcional y T_i el tiempo integral. Aplicando la Transformada Laplace se obtiene:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s} \right) \quad (7)$$

Para el diseño de los controladores se ha utilizado el método λ , cuyas reglas de sintonía son las siguientes (Åström y Hägglund, 2005):

$$T_i = \tau \quad (8)$$

$$k_p = \frac{\tau}{k(t_r + \lambda)} \quad (9)$$

En este trabajo, se ha fijado $\lambda = 0,3\tau$ para el controlador de temperatura, y $\lambda = \tau$ para el de humedad.

2.6. Método de control basado en eventos

El control basado en eventos es una metodología que permite adaptar y mejorar algoritmos de control tradicionales para encontrar un compromiso entre rendimiento y esfuerzo de control (o cambios en la señal de control) de forma relativamente sencilla. Su principal ventaja es la posibilidad de generar esfuerzo de control cuando realmente sea necesario y ventajoso para el proceso que se está controlando (Dormido et al., 2008). Un controlador PI estándar requiere que el actuador responda al error en cada instante de tiempo. Esto significa que el controlador mantiene una mayor precisión de control cambiando frecuentemente la señal de control para mantener la consigna deseada. En comparación, el control basado en eventos permite reducir el esfuerzo de control de forma drástica sin aumentar demasiado el error de realimentación. Existen multitud de variantes del control basado en eventos, pero la más sencilla es la basada en la estrategia del muestreo *Send-on-delta* simétrico

(Pawlowski et al., 2016). De manera resumida, con este método, el controlador sólo se activa cuando el error supera unos límites concretos, $\pm\delta$. De lo contrario, el error se considera nulo. Este método se puede implementar con la inclusión de una zona muerta en el lazo de control, como se presenta en la Figura 5 mediante el bloque SSOD que representa el muestreo *Send-on-delta* simétrico sobre la señal de error.

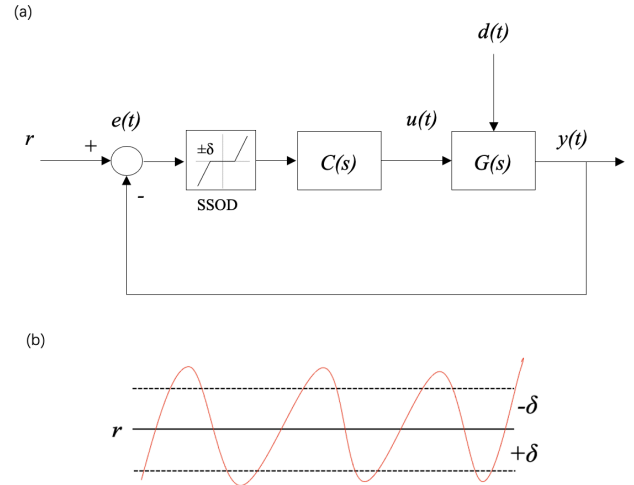


Figura 5: Esquema de control basado en eventos: (a) muestra el lazo de control, (b) presenta la referencia r con línea continua en negro, los límites superiores e inferiores con líneas negras punteadas, y la salida controlada en rojo.

Nótese que un valor de δ demasiado grande provocará la oscilación de la salida del proceso. Por el contrario, un valor de δ pequeño no supondría una reducción del esfuerzo de control. Para el caso de los CSG, el valor óptimo de δ no ha sido previamente estudiado. Por ello, en este trabajo se han evaluado diferentes valores de $\delta = [0, 0,1, 0,2, 0,5, 1]$, comprando el rendimiento entre el control basado en eventos y el control PI con el esquema clásico, según los siguientes índices:

1. Integral del error absoluto: $IAE = \sum |e(t)|$
2. ΔIAE en porcentaje: $(IAE - IAE_{\delta=0})/IAE_{\delta=0}$
3. Esfuerzo de control: $IAU = \sum |u(t) - u(t-1)|$
4. ΔIAU en porcentaje: $(IAU - IAU_{\delta=0})/IAU_{\delta=0}$
5. Número de eventos: E
6. ΔE en porcentaje: $(E_{\delta=0} - E)/E_{\delta=0}$

Destacar que los problemas de estabilidad de este algoritmo basado en SSOD relativo a la presencia de ciclos límite y fenómenos tipo Zenón han sido ampliamente estudiados en la literatura demostrado la estabilidad de este algoritmo tal y como se puede encontrar en (Beschi et al., 2013).

2.7. Esquema de control de prioridad de humedad

En este apartado se expone el método de control mixto para temperatura y humedad, considerando que normalmente sólo actúa el controlador PI de temperatura, pero, si fuera necesario, el método permite dar prioridad al control de la humedad para mantenerla regulada evitando unos rangos no deseados. En los CSG, no se suele presentar la humedad excesivamente baja, por lo que el objetivo de control se centra en evitar los valores elevados.

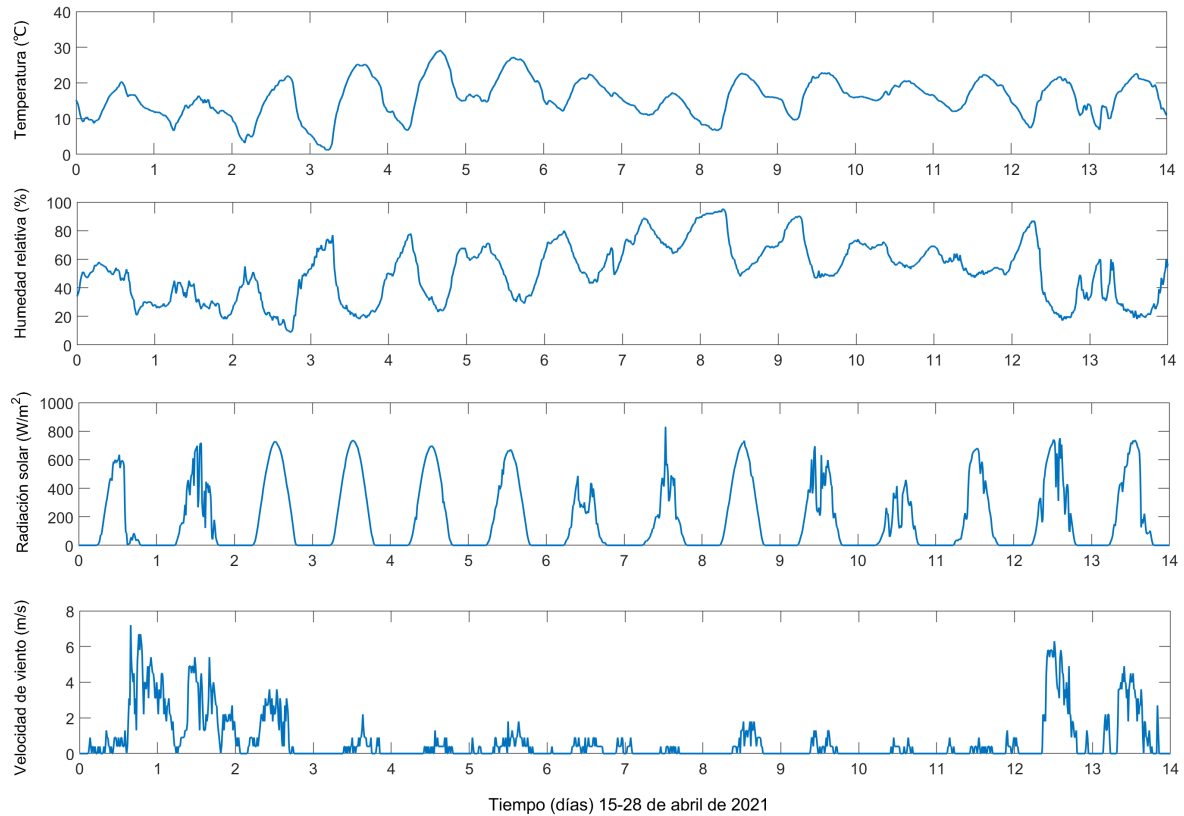


Figura 6: Datos del clima en el exterior del invernadero, medidos entre el 15 y el 28 de abril de 2021.

En este trabajo, la humedad relativa se controla mediante un límite superior dado, y cuando se encuentra por encima de ese límite, se aumenta la apertura de ventilación. En concreto, se ha establecido un 80 % de humedad relativa como límite superior y un 60 % como límite inferior. Cuando la humedad relativa está por encima del límite superior, el controlador PI de humedad se activa para tratar de reducirla al 60 %. Cuando la humedad relativa es menor del 60 %, el controlador de temperatura se reactiva para su control en la consigna establecida. Nótese que son dos casos diferentes los que ocurren. Cuando la humedad se mantiene en el rango [60, 80] %, el controlador de humedad no se activa. Cuando la humedad relativa supera el 80 %, el controlador de humedad se mantiene activado con prioridad sobre el de temperatura hasta que la humedad vuelva a ser inferior al 60 %.

3. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados del estudio de simulación para el control de temperatura y humedad con los métodos anteriormente descritos. Se compara el rendimiento del control de temperatura en un único día y en 14 días consecutivos, evaluando el método de control clásico y el basado en eventos. El mismo conjunto de datos se ha empleado para comprobar el desempeño de los controladores de humedad, tanto para la humedad absoluta como relativa. Finalmente, se presentan los resultados de simulación para el esquema de control selectivo de temperatura y humedad. En este caso, se utilizan los mismos 14 días consecutivos considerando la estrategia de

control de prioridad de humedad. La Figura 6 muestra los datos meteorológicos utilizados para calcular los modelos ARX y realizar las simulaciones de control.

3.1. Modelos ARX y funciones de transferencia

Los modelos ARX fueron seleccionados en base a los que mejor ajuste presentaron para un día en cada semana de las dos disponibles. Debido a la extensión limitada de este artículo, sólo se presenta en (10)-(14) el modelo ARX para la temperatura, identificado para el día 19 de abril de 2021, con un ajuste del 85,49 % según (3).

$$A(z) = 1 - 2,41z^{-1} + 1,84z^{-2} - 0,15z^{-3} - 1,00z^{-4} + 1,60z^{-5} - 1,56z^{-6} + 0,96z^{-7} - 0,27z^{-8} \quad (10)$$

$$B_1(z) = 4,14 \cdot 10^{-5}z^{-7} - 8,28 \cdot 10^{-5}z^{-8} - 6,70 \cdot 10^{-5}z^{-9} \quad (11)$$

$$B_2(z) = 9,62 \cdot 10^{-3}z^{-7} - 8,70 \cdot 10^{-3}z^{-8} - 0,91 \cdot 10^{-3}z^{-9} \quad (12)$$

$$B_3(z) = 3,01 \cdot 10^{-4}z^{-7} - 3,81 \cdot 10^{-4}z^{-8} + 0,80 \cdot 10^{-4}z^{-9} \quad (13)$$

$$B_4(z) = -0,07z^{-7} + 0,14z^{-8} - 0,06z^{-9} \quad (14)$$

El ajuste de este modelo se puede apreciar gráficamente en la Figura 7. La identificación de los modelos ARX para la humedad se ha realizado distinguiendo entre aperturas de la ventilación durante el periodo nocturno y diurno, y entre la humedad absoluta y la humedad relativa.

Para ventilación en el periodo diurno, la Figura 8 presenta la respuesta del modelo ARX para la humedad relativa, con un ajuste del 79,35 %, y la Figura 9 presenta la respuesta del modelo ARX para la humedad absoluta, con un ajuste del 80,52 %.

Ambos modelos poseen un buen ajuste a los datos, lo que significa que representan de forma aceptable la respuesta del sistema para cambios en la apertura de las ventanas del invernadero y para las perturbaciones climáticas. Las expresiones de los modelos para la humedad no se muestran por ahorro de espacio ya que son de la misma forma que (10)-(14), aunque de distinto orden y valores.

por lo que la fuerza impulsora de la ventilación natural proviene de la diferencia de condiciones entre el interior y el exterior del invernadero, lo que produce una reducción de la humedad en el aire interior.

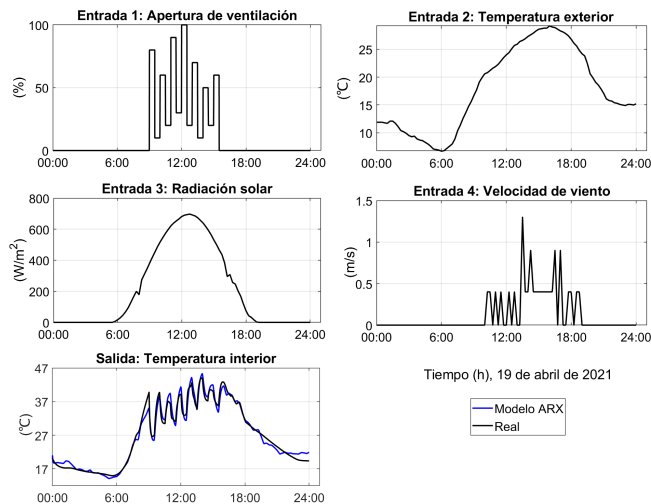


Figura 7: Modelo ARX identificado para la temperatura con datos del día 19 de abril de 2021.

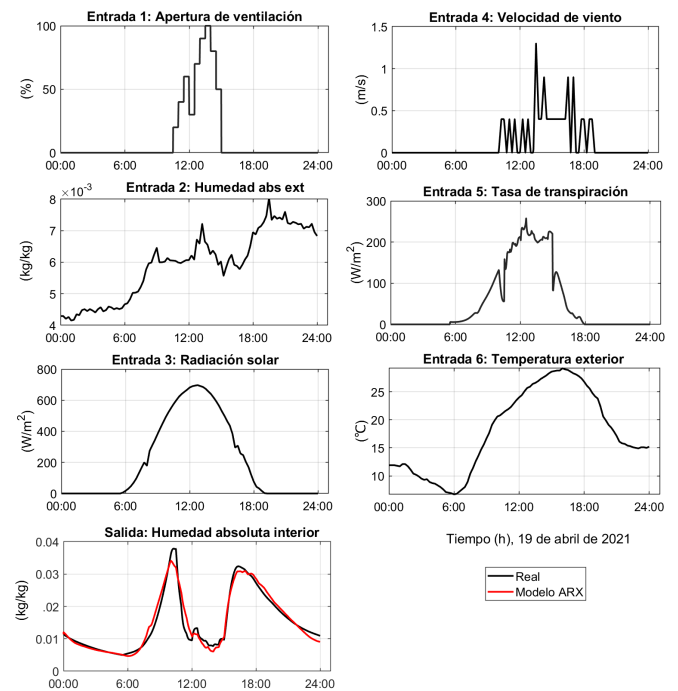


Figura 9: Modelo ARX para la humedad absoluta con ventilación en el periodo diurno, identificado con datos del día 19 de abril de 2021.

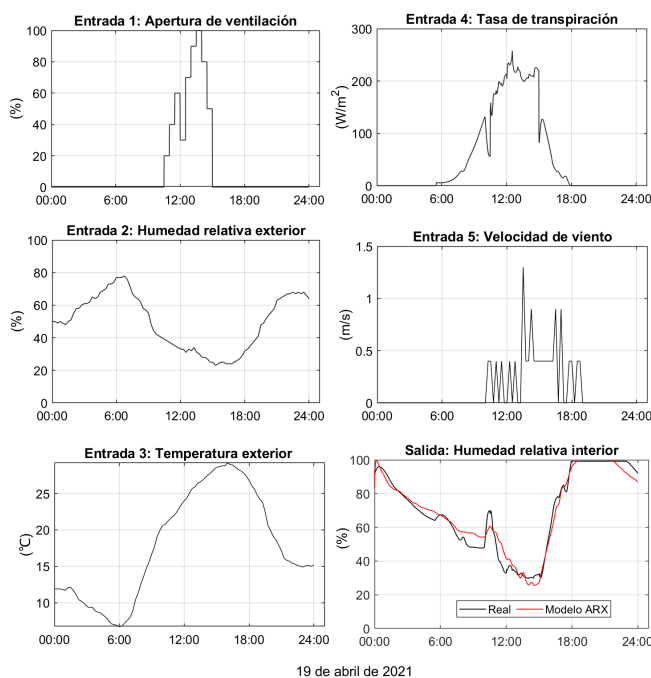


Figura 8: Modelo ARX para la humedad relativa con ventilación en el periodo diurno, identificado con datos del día 19 de abril de 2021.

Las Figuras 10 y 11 presentan la identificación de los modelos ARX de humedad pero para aperturas de la ventilación en el periodo nocturno, entre las 21:00 y las 05:00 horas del siguiente día. El modelo de la humedad relativa posee un ajuste del 81,32 %, y el de la humedad absoluta un ajuste del 86,61 %. Se puede apreciar que no suele haber viento durante la noche,

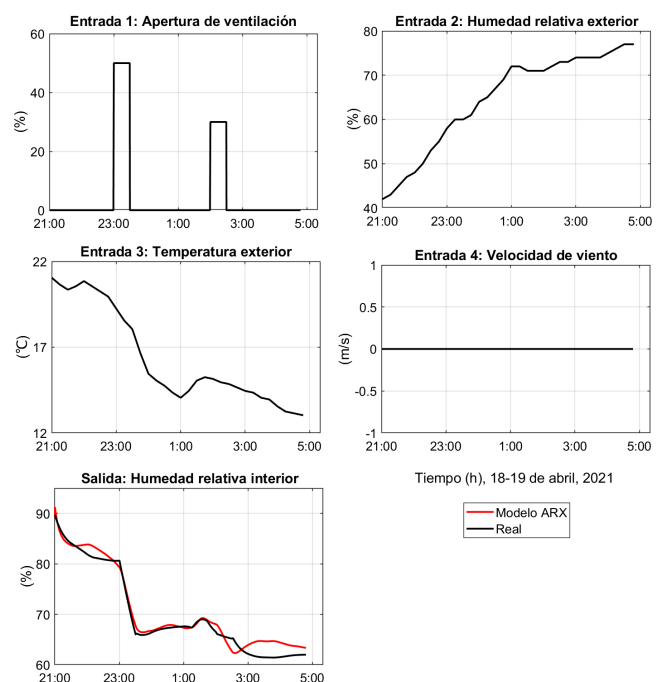


Figura 10: Modelo ARX para la humedad relativa con ventilación en el periodo nocturno, identificado con datos del día 19 y 20 de abril de 2021.

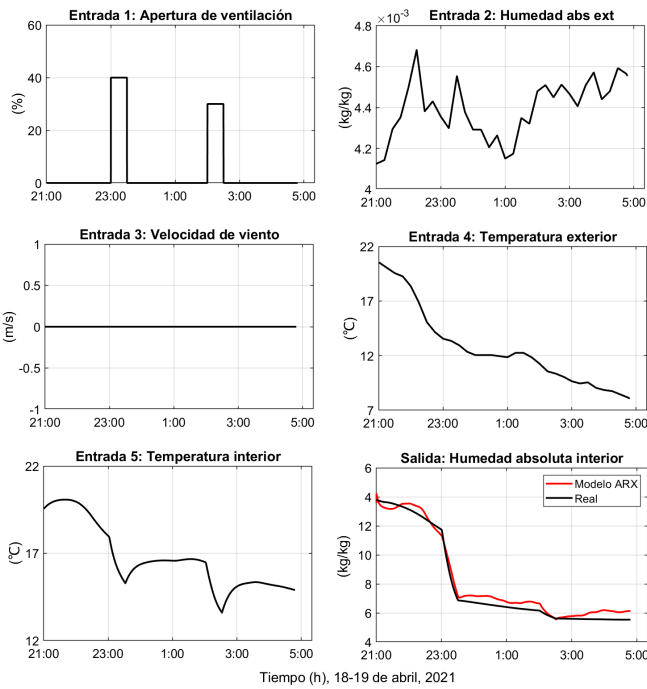


Figura 11: Modelo ARX para la humedad absoluta con ventilación en el periodo nocturno, identificado con datos del día 18 y 19 de abril de 2021.

Una vez calculados los modelos ARX, se procedió a determinar funciones de transferencia de primer orden para la temperatura, la humedad relativa y la humedad absoluta, mediante el procedimiento descrito en la sección 2.5.

En la Figura 12 se muestran las respuestas a un escalón de entrada para la ventilación, para las que las funciones de transferencia resultantes son las siguientes:

- Temperatura: $G_T(s) = \frac{-19,2}{765s+1} e^{-120s}$
- Humedad relativa diurna: $G_{HRd}(s) = \frac{-51,2}{6516s+1} e^{-205s}$
- Humedad relativa nocturna: $G_{HRn}(s) = \frac{-27,4}{1718s+1} e^{-342s}$
- Humedad absoluta diurna: $G_{HAD}(s) = \frac{-0,00154}{2574s+1} e^{-30s}$
- Humedad absoluta nocturna: $G_{HAN}(s) = \frac{-0,0394}{3494s+1} e^{-229s}$

Destacar los valores de las constantes de tiempo y especialmente de las ganancias estáticas obtenidas, que son drásticamente mayores a los valores típicos obtenidos en invernaderos de la zona del Mediterráneo. Este hecho es debido al tamaño reducido de los invernaderos solares chinos y al sistema de ventilación de los mismos, que da lugar a gradientes muy elevados frente a cambios en las señales de control. Este hecho ya fue observado en el desarrollo del modelo basado en primeros principios que se utiliza como base en este trabajo (Liu et al., 2021).

Cada una de estas funciones de transferencia se utilizan para determinar los respectivos controladores mediante el método λ (véase la sección 2.5). Dado que las ventanas del invernadero tienen una apertura restringida entre el 0 % y el 100 %, los controladores incorporan el mecanismo *anti-windup* para la desaturación del término integral, con una constante de seguimiento $T_i = \sqrt{T_i}$.

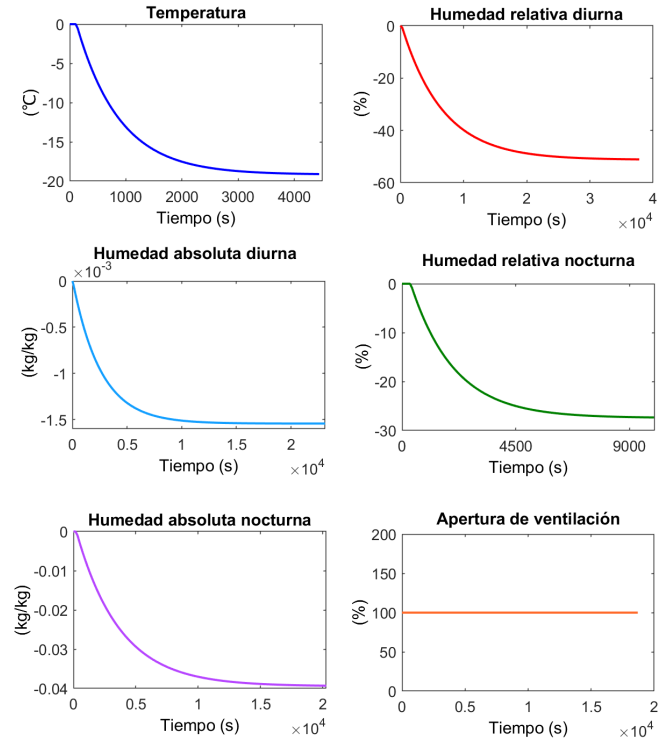


Figura 12: Respuestas de los modelos ARX para un escalón del 100 % en la entrada de ventilación.

3.2. Estudio comparativo de controladores basados en eventos para la temperatura

Para examinar el rendimiento del control basado en eventos para la temperatura, es necesario adoptar diferentes valores para δ , ya que un valor demasiado grande o pequeño puede conducir, por ejemplo, a un aumento excesivo del error de control. Por tanto, en esta sección se analizan los resultados tras adoptar los siguientes valores: $\delta = [0, 0,1, 0,2, 0,5, 1]$.

Como se muestra en la Figura 13, el controlador PI ofrece un desempeño muy bueno para controlar la temperatura el día 20 de abril de 2021. Con $\delta = 0$ (que corresponde al caso clásico sin eventos) se observa que la señal de control provoca cambios constantemente en la apertura de la ventilación. Esto ofrece mayor precisión de control, al mantenerse la temperatura muy cerca de la consigna, pero, a su vez, causa un mayor desgaste de los motores de las ventanas y un mayor consumo de energía asociado. En la Tabla 1 se compara el desempeño para cada uno de los valores de δ con los que se ha simulado la estrategia de control. Se observa cómo el número de eventos (representado por E) se reduce significativamente a medida que se incrementa el valor de δ , cuyo valor óptimo será aquel que permita un balance entre ΔE y ΔIAU , y ΔIAE . Por ejemplo, si se incrementa δ de 0,5 a 1, ΔE aumenta de 43,8 % a 50,4 %, pero se duplica el valor de ΔIAE , pasando de 1,13 % a 2,29 %. Por otro lado, IAU representa el esfuerzo de control, por lo que reducir su valor se traduce en un ahorro en las veces en las que se accionan los motores de las ventanas y también en ahorro energético. Si se incrementa δ de 0,1 a 0,5, el valor de IAU se reduce considerablemente y se consigue triplicar ΔIAU , de 8,3 % a 25,6 %. Para valores de δ entre 0,5 y 1, ΔIAU cambia menos del doble de su valor. Esto significa que cambiar el valor

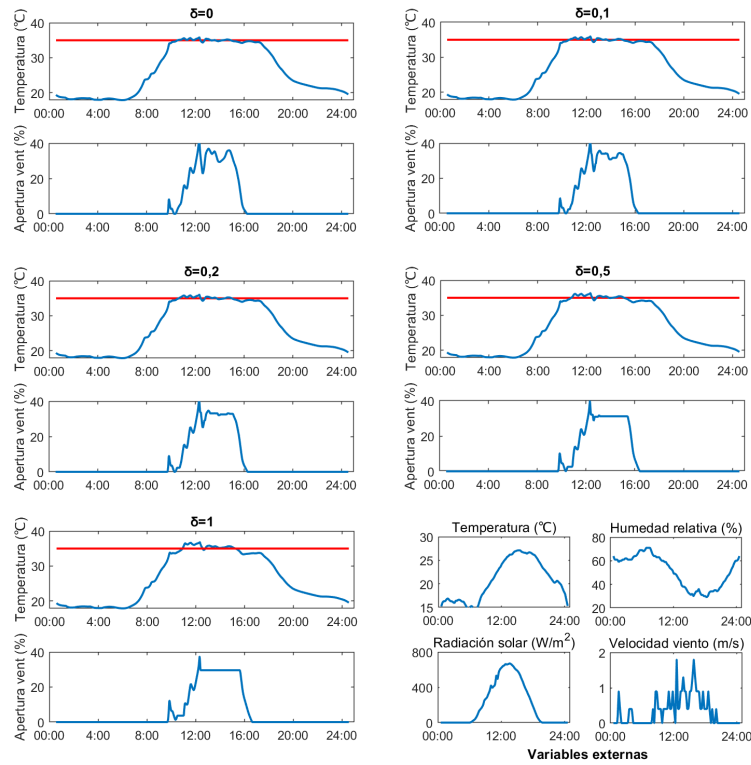


Figura 13: Control de temperatura con diferentes valores de δ para el 20 de abril de 2021.

de δ por encima de 0,5 no es rentable debido al incremento del error. Por tanto, se deduce que un valor adecuado para δ en este caso es 0,5.

Tabla 1: Desempeño del control de temperatura para diferentes valores de δ

δ	IAE (°C)	ΔIAE (%)	E	ΔE (%)	IAU
0	$7,7409 \cdot 10^5$	0	22968	0	156,0
0,1	$7,7593 \cdot 10^5$	0,24	19463	15,3	143,1
0,2	$7,7776 \cdot 10^5$	0,47	17287	24,7	132,6
0,5	$7,8286 \cdot 10^5$	1,13	12913	43,8	116,1
1	$7,9179 \cdot 10^5$	2,29	11395	50,4	105,4

3.3. Estudio comparativo de dos métodos de control de la humedad

En este apartado se discuten los resultados para comparar los dos métodos de control propuestos para regular la humedad.

El primero de ellos consiste en corregir directamente el error entre la humedad relativa y una referencia constante, con un esquema de control de realimentación clásico. El segundo método consiste en corregir el error entre la salida de humedad absoluta y una referencia dinámica, que se obtiene a partir de una referencia de humedad relativa constante y de la temperatura que se mide en el invernadero en cada instante de tiempo. Para ello, la referencia dinámica de humedad absoluta se genera mediante las siguientes expresiones:

$$P_w(t) = 610,78 \cdot \frac{r_{HR}}{100} \cdot e^{\left(\frac{T(t)-273,15}{T(t)-34,85} \cdot 17,2694\right)} \quad (15)$$

$$r_{HA}(t) = 0,622 \cdot \frac{P_w(t)}{P - P_w(t)} \quad (16)$$

donde P_w es la presión del vapor de agua, P es la presión atmosférica, r_{HR} es la referencia constante de humedad relativa, y r_{HA} es la referencia dinámica de humedad absoluta. Cabe destacar que, aunque se realiza un seguimiento de una referencia dinámica de la humedad absoluta, la consigna siempre es fija para la humedad relativa, lo cual resulta más sencillo de comprender para los agricultores que están más familiarizados con esta variable para detectar valores perjudiciales que puedan causar enfermedades en sus cultivos.

Atendiendo a los resultados que se presentan en la Figura 14, el primer método de control se comporta adecuadamente para consignas de humedad relativa bajas, como se observa para las consignas del 40% y del 50%. Sin embargo, cuando la consigna es del 60%, la precisión disminuye, y para consignas por encima del 70%, no se consigue controlar la humedad.

En comparación, en la Figura 15 se aprecia que el segundo método es capaz de actuar y regular la humedad relativa con todos los valores de consignas, pero ofrece menor precisión de control que el primer método. Por lo tanto, se puede comprobar que es importante tener en cuenta en el control de la humedad relativa tanto el contenido de vapor de agua en el aire como la temperatura, aunque se recomienda escoger entre el primer o el segundo método según la aplicación y el rango de consignas.

3.4. Control de temperatura en días consecutivos

Una vez establecido el valor óptimo de δ , el rendimiento del control de temperatura se evaluó utilizando dos semanas consecutivas de datos considerando las condiciones climáticas expuestas en la Figura 6, y comparando el control basado en eventos con $\delta = 0,5$ frente a un control PI estándar, es decir, con $\delta = 0$.

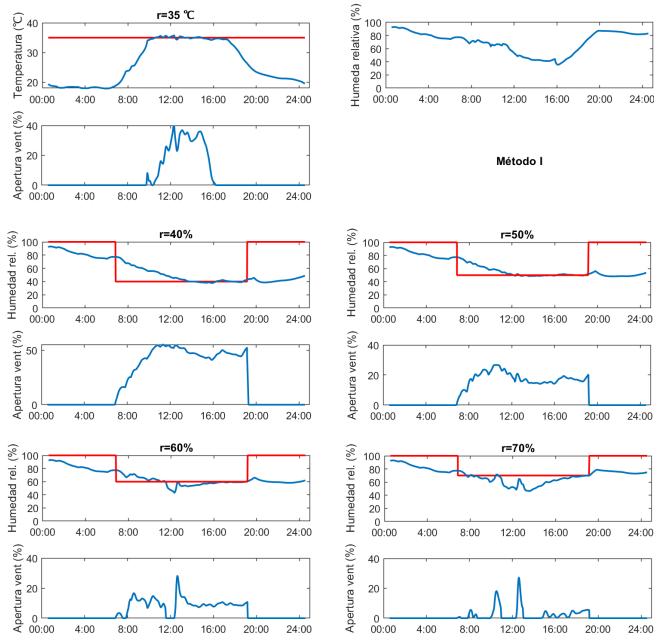


Figura 14: Comparación de resultados del primer método de control de humedad relativa para el día 20 de abril de 2021. Las gráficas situadas en la parte superior muestran la evolución de la humedad sin control (sólo de temperatura). Las gráficas inferiores muestran la respuesta de control para distintos valores de consignas.

Como se observa en la Figura 16, en ambos casos se obtienen unos resultados de control muy satisfactorios. Las desviaciones que se producen en la temperatura, por ejemplo, en los días 2, 8, 10, 12 y 13, se deben fundamentalmente a los cambios de radiación solar exterior (véase la Figura 6), que afecta como perturbación.

Las fluctuaciones en la velocidad del viento tienen menos impacto en el rendimiento del control que la radiación solar. La temperatura exterior durante el día no presenta cambios notables, por lo que no es un factor clave que afecte el rendimiento del control.

Comparando los resultados que se muestran en la Tabla 2, el control basado en eventos permite reducir el número de eventos en un 33,85 %, produciéndose un incremento del error de tan sólo un 0,89 %. Además, consigue reducir el esfuerzo de control en un 18,8 %. Tanto ΔE como ΔIAU son menores para las dos semanas consecutivas que en un solo día, lo que significa que el método de control basado en eventos perdió efectividad en aquellos días en los que las perturbaciones fluctúan. No obstante, los resultados confirman que este método de control es adecuado para regular la temperatura ayudando a disminuir el uso de los motores de la ventilación.

3.5. Funcionamiento del control selectivo con prioridad para la humedad

El esquema propuesto en la sección 2.7 se ha ensayado para verificar que permite controlar la humedad evitando que tome valores altos mientras se mantiene una temperatura elevada. En la Figura 17 se muestran los resultados de control para dos semanas consecutivas de datos, en las que las consignas para las variables a controlar se mantuvieron fijas. Mantener la consigna de temperatura fija es una práctica habitual en invernaderos,

que, en ocasiones, puede conllevar que la humedad relativa se incremente hasta valores que pueden ser perjudiciales para el cultivo, como se puede apreciar en los días 2, 7, 8 y 9. Para esos mismos días, el control de prioridad para la humedad actúa y evita que sobrepase el límite de 80 %, como se puede observar, especialmente, en el día 8, cuando se abren las ventanas del invernadero. Dicha apertura, sin embargo, provoca una reducción en la temperatura nocturna. Por tanto, sería interesante diseñar una estrategia independiente de reducción de humedad para un cultivo específico, dependiendo de la tolerancia a bajas temperaturas.

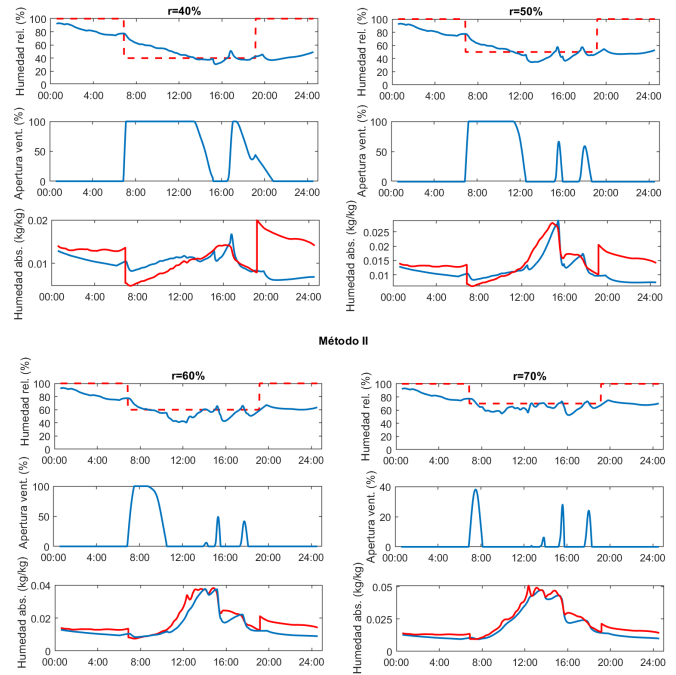


Figura 15: Resultados del segundo método de control de humedad relativa para el día 20 de abril de 2021.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha aplicado por primera vez el control PI para la temperatura y la humedad en invernaderos solares chinos. El método de control basado en eventos muestra un comportamiento adecuado que permite reducir el esfuerzo de control. Se espera poder aplicar este enfoque a distintos conjuntos de invernaderos y comprobar el ahorro en términos de movimientos realizados por los motores de las ventanas y de la energía que consumen. Además, este trabajo pone de manifiesto las dificultades y los desafíos de control de la humedad en invernaderos y propone un método factible para tratar de reducir el error de control de esta variable. Se demuestra que un control combinado de la temperatura y de la humedad es posible mediante un método que otorgue prioridad a mantener la humedad por debajo de niveles considerados demasiado elevados. De esta forma, se contribuye a mejorar la producción del cultivo y a la prevención en la aparición de enfermedades que puedan afectar al mismo. Como trabajos futuros se contemplará la implementación del algoritmo de control propuesto en un invernadero de China del centro NERCITA.

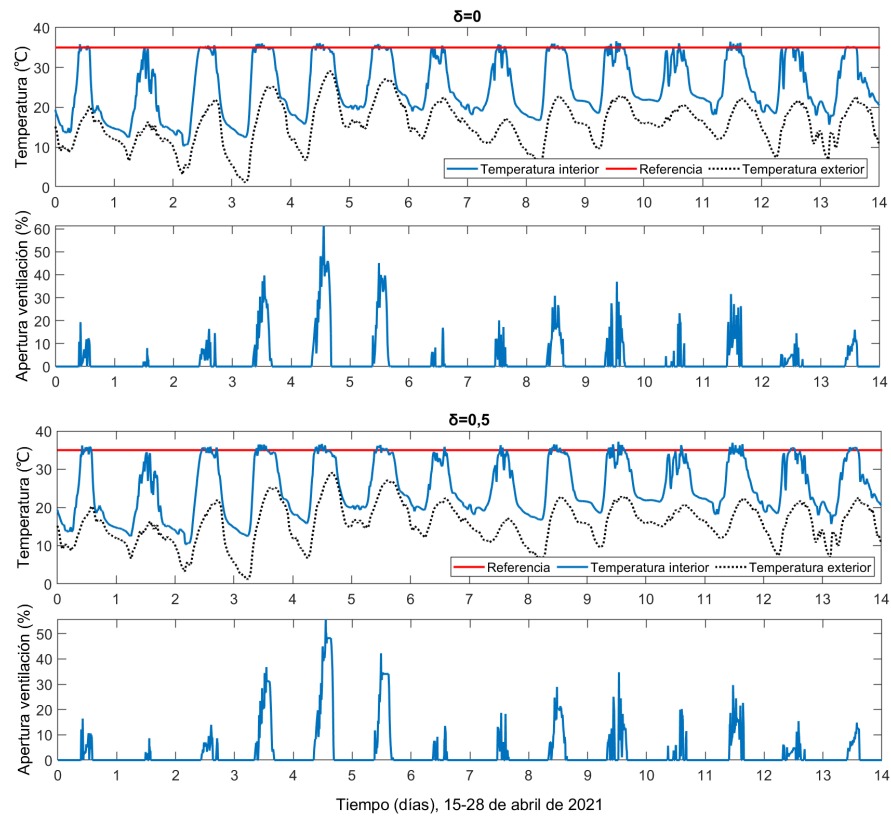


Figura 16: Resultados de control de temperatura para dos semanas consecutivas (del 15 al 28 de abril de 2021).

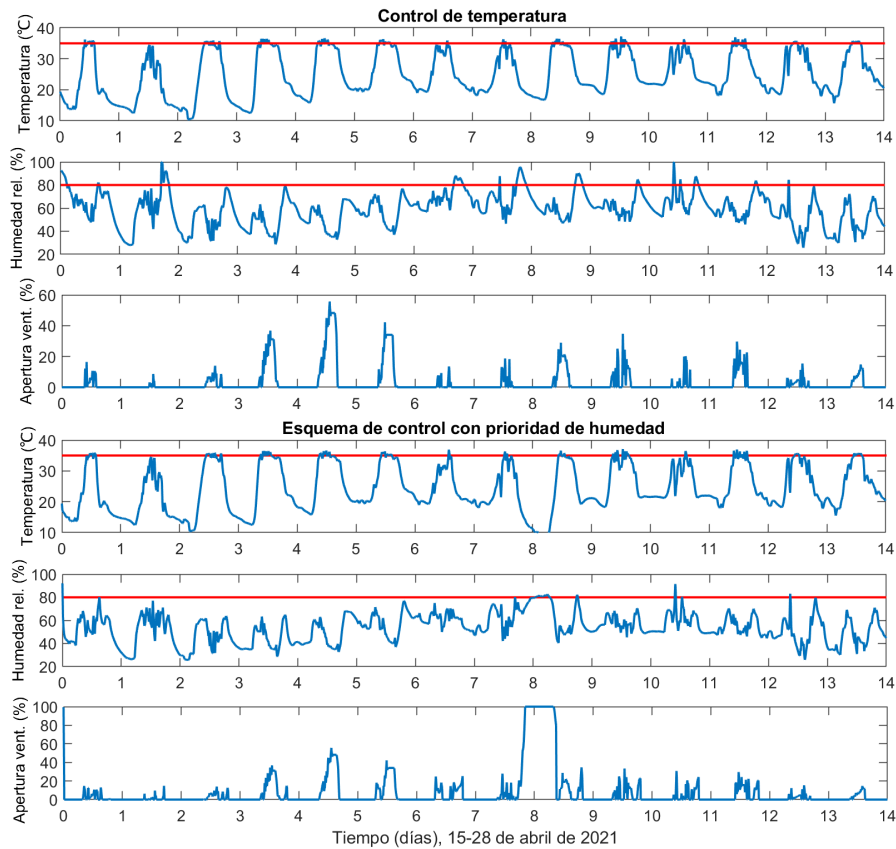


Figura 17: Comparación entre los resultados de controlar solamente la temperatura con $\delta = 0,5$ (gráficas de la parte superior) y de controlar la temperatura y la humedad con el esquema de control prioritario (gráficas de la parte inferior).

Tabla 2: Evaluación de resultados de control de temperatura con $\delta = 0$ y $\delta = 0,5$ durante los días consecutivos del 15 al 28 de abril de 2021.

δ	IAE ($^{\circ}\text{C}$)	ΔIAE (%)	E	ΔE (%)	IAU	ΔIAU
0	$1,22 \cdot 10^7$	0	$2,53 \cdot 10^5$	0	2094,3	0
0,5	$1,23 \cdot 10^7$	0,89	$1,68 \cdot 10^5$	33,85	1700,4	18,8

Agradecimientos

El autor Liu Ran agradece el apoyo económico brindado por el Consejo de Becas de China (*China Scholarship Council*, nº. 201909505002). El autor Francisco García-Mañas es beneficiario de una ayuda FPU del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Referencias

- Åström, K. J., Hägglund, T., 2005. Advanced PID Control. ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, Research Triangle Park, NC 27709.
- Beschi, M., Dormido, S., Sanchez, J., Visioli, A., 2013. Stability analysis of symmetric send-on-delta PI control of a greenhouse system. In: 2013 American Control Conference. pp. 1771–1776.
DOI: 10.1109/ACC.2013.6580092
- Beschi, M., Pawlowski, A., Guzmán, J. L., Berenguel, M., Visioli, A., 2014. Symmetric send-on-delta PI control of a greenhouse system. IFAC Proceedings Volumes 47 (3), 4411–4416.
DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.01028
- Dormido, S., Sánchez, J., Kofman, E., 2008. Muestreo, control y comunicación basados en eventos. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 5 (1), 5–26.
DOI: 10.1016/S1697-7912(08)70120-1
- García-Mañas, F., Guzmán, J. L., Rodríguez, F., Berenguel, M., Hägglund, T., 2021. Experimental evaluation of feedforward tuning rules. Control Engineering Practice 114, 104877.
DOI: 10.1016/j.conengprac.2021.104877
- Guo, Y., Zhao, H., Zhang, S., Wang, Y., Chow, D., 2021. Modeling and optimization of environment in agricultural greenhouses for improving cleaner and sustainable crop production. Journal of Cleaner Production 285, 124843.
DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124843
- Körner, O., Challa, H., 2003. Process-based humidity control regime for greenhouse crops. Computers and Electronics in Agriculture 39 (3), 173–192.
DOI: 10.1016/S0168-1699(03)00079-6
- Li, J., Li, L., Wang, H., Ferentinos, K. P., Li, M., Sigrimis, N., 2017. Proactive energy management of solar greenhouses with risk assessment to enhance smart specialisation in China. Biosystems Engineering 158, 10–22.
DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.03.007
- Liu, R., Li, M., Guzmán, J. L., Rodríguez, F., 2021. A fast and practical one-dimensional transient model for greenhouse temperature and humidity. Computers and Electronics in Agriculture 186, 106186.
DOI: 10.1016/j.compag.2021.106186
- Liu, R., Wang, H., Guzmán, J. L., Li, M., 2022. A model-based methodology for the early warning detection of cucumber downy mildew in greenhouses: An experimental evaluation. Computers and Electronics in Agriculture 194, 106751.
DOI: 10.1016/j.compag.2022.106751
- Montoya-Ríos, A. P., García-Mañas, F., Guzmán, J. L., Rodríguez, F., 2020. Simple tuning rules for feedforward compensators applied to greenhouse daytime temperature control using natural ventilation. Agronomy 10 (9), 1327.
DOI: 10.3390/agronomy10091327
- Pawlowski, A., Beschi, M., Guzmán, J. L., Visioli, A., Berenguel, M., Dormido, S., 2016. Application of SSOD-PI and PI-SSOD event-based controllers to greenhouse climatic control. ISA Transactions 65, 525–536.
DOI: 10.1016/j.isatra.2016.08.008
- Rodríguez, F., Guzmán, J. L., Berenguel, M., Arahal, M. R., 2008. Adaptive hierarchical control of greenhouse crop production. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing 22 (2), 180–197.
DOI: 10.1002/acs.974
- Smit, J. N. & Combrink, N. J. J., 2005. Pollination and yield of winter-grown greenhouse tomatoes as affected by boron nutrition, cluster vibration and relative humidity. South African Journal of Plant and Soil 22 (2), 110–115.
DOI: 10.1080/02571862.2005.10634691
- Wang, L., Zhang, H., 2018. An adaptive fuzzy hierarchical control for maintaining solar greenhouse temperature. Computers and Electronics in Agriculture 155, 251–256.
DOI: 10.1016/j.compag.2018.10.023
- Wang, T., Wu, G., Chen, J., Cui, P., Chen, Z., Yan, Y., Zhang, Y., Li, M., Niu, D., Li, B., Chen, H., 2017. Integration of solar technology to modern greenhouse in China: Current status, challenges and prospect. Renewable and Sustainable Energy Reviews 70, 1178–1188.
DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.020
- Xu, D., Du, S., van Willigenburg, G., 2018a. Adaptive two time-scale receding horizon optimal control for greenhouse lettuce cultivation. Computers and Electronics in Agriculture 146, 93–103.
DOI: 10.1016/j.compag.2018.02.001
- Xu, D., Du, S., van Willigenburg, L. G., 2018b. Optimal control of chinese solar greenhouse cultivation. Biosystems Engineering 171, 205–219.
DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.05.002