

# CONTROL CLIMÁTICO DE INVERNADEROS CON COMPENSACIÓN DE PERTURBACIONES MEDIBLES

M. Berenguel<sup>1\*</sup>, J.D. Álvarez<sup>1</sup>, A. Cruz<sup>1</sup>, F. Rodríguez<sup>1</sup>, J.A. Sánchez-Molina<sup>1</sup>, J.L. Guzmán<sup>1</sup>, F. García-Mañas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Informática. Universidad de Almería, CIESOL, Ceia3. Almería, \*beren@ual.es

## Resumen

*Este trabajo presenta el diseño de técnicas de control climático de invernaderos a través de la ventilación natural, explotando las perturbaciones medibles y teniendo en cuenta las restricciones de operación. Un invernadero constituye una planta ideal para el crecimiento de cultivos, ya que es un entorno cerrado donde las variables del clima y la fertirrigación pueden ser controladas mediante actuadores climáticos. Se describe el modelo no lineal utilizado para simular el comportamiento del invernadero usando datos de una instalación real, la calibración del mismo y el desarrollo y comparación de técnicas de control que hacen uso de modelos linealizados en torno a puntos de operación y del modelo no lineal completo (linealización por realimentación).*

**Palabras clave:** Control PID, control anticipativo, linealización por realimentación, invernadero.

## 1. INTRODUCCIÓN

El control climático de los invernaderos permite la producción óptima de los cultivos. La temperatura del aire en el interior del invernadero afecta considerablemente a los procesos fisiológicos de las plantas y, por tanto, es importante regularla en un rango adecuado en función de la variedad de cultivo y la ubicación del invernadero. Esto acelera su crecimiento y aumenta la calidad de la producción a la vez que economiza el consumo de energía [6,9,10].

El comportamiento dinámico del microclima dentro de un invernadero es una combinación de procesos físicos que involucran transferencia de energía (radiación y calor) y balance de masa (vapor de agua y flujos de dióxido de carbono). Estos procesos dependen de las condiciones externas ambientales, estructura del invernadero, tipo y estado del cultivo, y del efecto de los actuadores.

Las principales perturbaciones que influyen en la temperatura interior del invernadero cuando este se controla mediante la ventilación natural son la radiación solar, la temperatura y la velocidad del viento exteriores, así como la temperatura del suelo. Además, la temperatura se ve afectada por perturbaciones no medibles, como puede ser la transpiración del cultivo. La ventilación natural

facilita el intercambio de aire entre el interior y el exterior del invernadero. El aire exterior, generalmente más frío que el interior, tiende a rellenar las capas más bajas del volumen del aire, y el aire caliente asciende a las capas más altas, saliendo al exterior a través de las ventilaciones cenitales [6,9].

Como es habitual, los modelos en este tipo de instalaciones se pueden obtener mediante primeros principios (físicos, fisiológicos, biológicos, químicos, balances de masa, energía y momento), que deben ser aplicados a todos sus elementos constituyentes o bien a través de identificación experimental. Los modelos se están desarrollando para aplicarlos a la infraestructura AgroConnect, cofinanciada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y fondos FEDER, dentro de la convocatoria de ayudas para la adquisición de equipamiento científico-tecnológico (2019).

En cuanto a técnicas de control, existen numerosas publicaciones en la literatura [9,10]. En relación con las tratadas en este trabajo, cabe destacar control PID [2,3,11], control anticipativo [4,6,8] y modificaciones al control basado en linealización por realimentación [1,5,7]. Es en esta última técnica de control en la que se basan las principales aportaciones de este trabajo, desarrollando un algoritmo básico que permite controlar la temperatura del invernadero en todo el rango de operación.

En la siguiente sección se describe el invernadero del que se han obtenido datos para calibración y validación de modelos. Los siguientes apartados resumen los modelos obtenidos, las técnicas de control desarrolladas y los resultados en simulación. El trabajo finaliza con las principales conclusiones y trabajos futuros.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

El invernadero (fig. 1) tiene una superficie de 1500 m<sup>2</sup> y un volumen de 6995 m<sup>3</sup>. Los datos con los que se ha realizado este análisis corresponden a cinco días del mes de agosto. La fig. 2 muestra la evolución del día 4 a modo de ejemplo. Los valores de la radiación solar y la velocidad del viento se filtran, pues la señal de medida contiene un alto nivel de ruido. La escala de tiempos es en minutos (un día de ensayo son 1440 minutos). La ventilación mostrada es la cenital, que es la única utilizada en este trabajo.

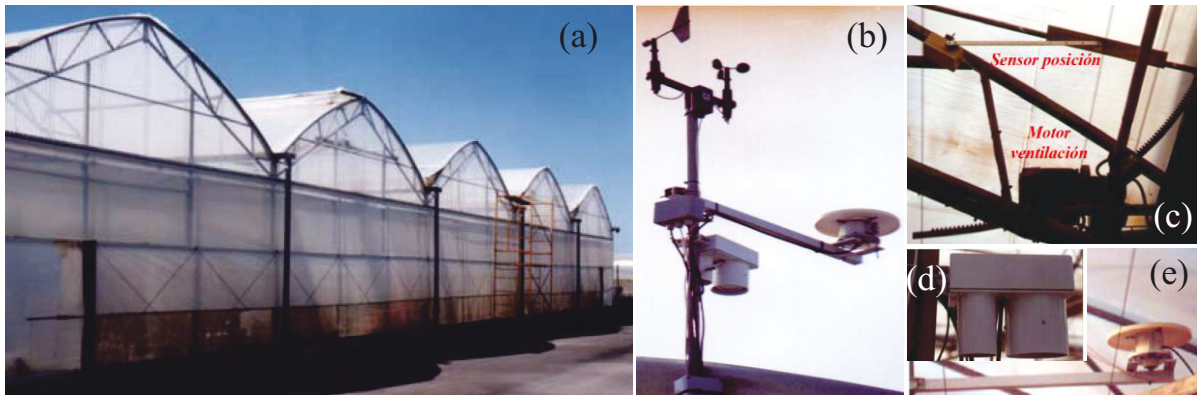


Figura 1. (a) Invernadero del que se han obtenido los datos para este trabajo, (b) estación meteorológica exterior, (c) Detalle de ventilación cenital, (d) Sensor de temperatura y humedad y (e) radiación interior

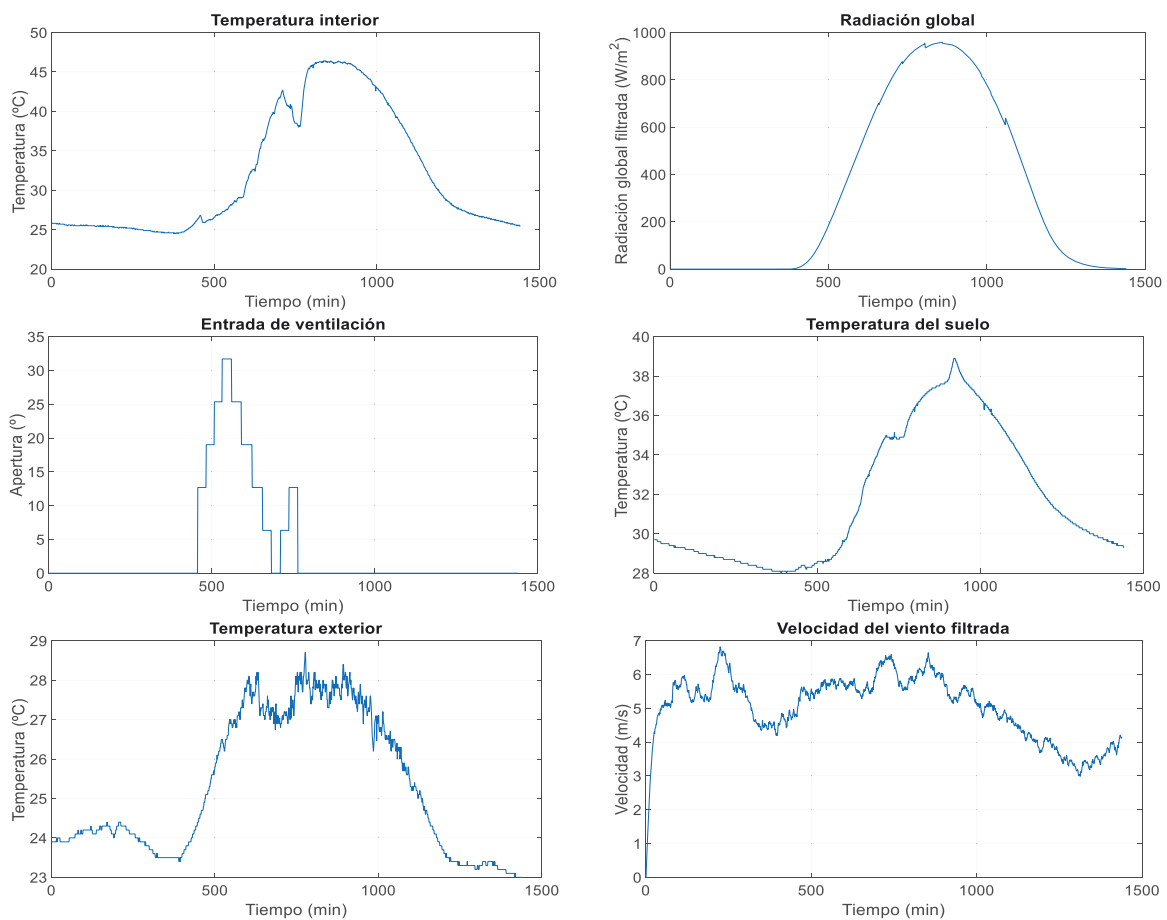


Figura 2. Evolución de las variables en el día 4.

Los valores de temperatura dentro del invernadero son muy altos, debido a la época del año. El motivo es que durante ese mes el invernadero no está en producción y es cuando se ensayan nuevas estrategias sin impactar sobre el cultivo, si bien no se puede analizar la influencia de la transpiración, requiriendo un análisis de robustez. Desde el punto de vista del control, la variable a controlar es la temperatura interna, la variable manipulable es la ventilación natural y las perturbaciones medibles consideradas son la temperatura del suelo del invernadero y la radiación, temperatura y velocidad del viento exteriores.

### 3. MODELADO DE LA PLANTA

La temperatura del aire en el invernadero puede ser modelada mediante el balance (1), obtenido de un modelo más completo de las referencias [9,10]:

$$c_{cesp,a}c_{den,a} \left( \frac{c_{vol}}{c_{sup}} \right) \frac{dX_{t,a}}{dt} = Q_{sol,a} + Q_{cnv,ss-a} + Q_{cnv-cnd,a-e} - Q_{ven,a-e} - Q_{per,a-e} - Q_{trp,cr} \quad (1)$$

donde  $X_{t,a}$  es la temperatura interior,  $Q_{sol,a}$  es la radiación solar absorbida por el invernadero,  $Q_{cnv,ss-a}$  es el flujo convectivo y conductivo con la superficie

del suelo,  $Q_{cnv-cnd,a-e}$  es el flujo convectivo con la cubierta,  $Q_{ven,a-e}$  es el flujo de calor debido a la ventilación natural,  $Q_{per,a-e}$  es el flujo de calor por pérdidas de infiltración,  $Q_{trp,cr}$  es el efecto de calor latente de la transpiración del cultivo, y  $c_{ter} = c_{cesp,a} c_{den,a} \left(\frac{c_{vol}}{c_{sup}}\right)$  es el producto del calor específico del aire, densidad del aire y altura efectiva del invernadero (volumen dividido por superficie). Todos los flujos de calor son referidos a  $1 \text{ m}^2$ .

*Contribución de la radiación solar.* La radiación solar transmitida a través de la cubierta y que alcanza al cultivo depende de un coeficiente de transmisión de onda corta, el cual depende del coeficiente de transmisión de calor con la cubierta, el estado del blanqueo, y de la malla de sombreado [9,10]. Aunque el aire es inerte a la radiación solar, se introduce un parámetro de eficiencia térmica de la radiación solar y el aporte al aire interior se simplifica a (2):

$$Q_{sol,a} = c_{rad} U_{malla} P_{r,e} \quad (2)$$

donde  $P_{r,e}$  es la radiación global exterior,  $U_{malla}$  es un parámetro que indica si la malla de sombreado está cerrada o abierta y  $c_{rad}$  un coeficiente de radiación.

*Transferencia de calor por convección entre la superficie del suelo y el aire interior,*  $Q_{cnv,ss-a}$ , es una función de la diferencia entre la temperatura del suelo  $X_{t,s}$  y la temperatura interna  $X_{t,a}$ :

$$Q_{cnv,ss-a} = c_{cvs}(X_{t,s} - X_{t,a}) \quad (3)$$

donde  $c_{cvs}$  es un coeficiente de convección considerado constante.

*Transferencia de calor por convección y conducción en la cubierta entre el aire exterior e interior.* Este proceso es considerado proporcional a la entre la temperatura exterior ( $P_{t,e}$ ) y la temperatura interior:

$$Q_{cnd-cnv,a-e} = c_{cvcb}(X_{t,a} - P_{t,e}) \quad (4)$$

donde  $c_{cvcb}$  es un coeficiente de pérdidas térmicas (en lo que a conducción y convección se refiere) considerado constante.

*Transferencia de calor al aire exterior debido a ventilación e infiltración.* Ambos flujos son modelados simultáneamente ya que el proceso de pérdida por infiltración es incluido como un efecto constante en el flujo de ventilación  $\phi_v$ . Por lo tanto, el siguiente modelo (5)-(7) describe dichos procesos [9,10]:

$$Q_{ven,a-e} + Q_{per,a-e} = \phi_v(X_{t,a} - P_{t,e}) \quad (5)$$

$$\phi_v = \left(\frac{c_{den,a} c_{cesp,a}}{c_{sup}}\right) \left(\frac{P_{t,e}}{X_{t,a} - P_{t,e}}\right) \left(\frac{c_{lon,vent} c_{desc}}{3c_{grav}}\right) \quad (6)$$

$$\left[ \left( \frac{(X_{t,a} - P_{t,e})}{P_{t,e}} c_{grav} V_{h,efec} + c_{cvi} P_{v,e}^2 \right)^{\frac{3}{2}} - (c_{cvi} P_{v,e}^2)^{\frac{3}{2}} \right] + V_{per}$$

donde  $c_{lon,vent}$  es la longitud total de la ventilación,  $c_{desc}$  el coeficiente de descarga,  $c_{grav}$  la aceleración

de la gravedad,  $c_{cvi}$  el coeficiente del efecto del viento y  $P_{v,e}$  la velocidad del viento en el exterior, con:

$$V_{h,efec} = 2 c_{anc,vent} \cdot \text{sen}\left(\frac{U}{2}\right) \quad (7)$$

siendo  $c_{anc,vent}$  la anchura total de la ventilación y  $U$  la apertura de ventilación (señal de control).  $V_{per}$  son pérdidas de calor con el invernadero cerrado, función de la velocidad del viento [9,10].

*Transferencia del calor latente por transpiración del cultivo.* En este caso este término no tiene influencia en los resultados y se considera en cualquier caso una perturbación no medible.

El modelo resumido en los párrafos previos puede ser utilizado tanto para fines de simulación como de control, tras un proceso de calibración de sus parámetros. En el caso del modelo tratado, los parámetros calibrados han sido:  $c_{rad}$ ,  $c_{cvs}$ ,  $c_{cvcb}$ ,  $c_{desc}$ ,  $c_{cvi}$ . Se ha utilizado un algoritmo genético para la obtención de esos parámetros utilizando cuatro días de resultados experimentales y minimizando el error cuadrático medio, limitando el rango de variación de los parámetros a valores lógicos según la literatura, siguiendo la metodología indicada en [9,10]. El Anexo 1 muestra los parámetros fundamentales del modelo. La fig. 3 muestra la comparativa entre la temperatura real y la del modelo no lineal para el día 4.

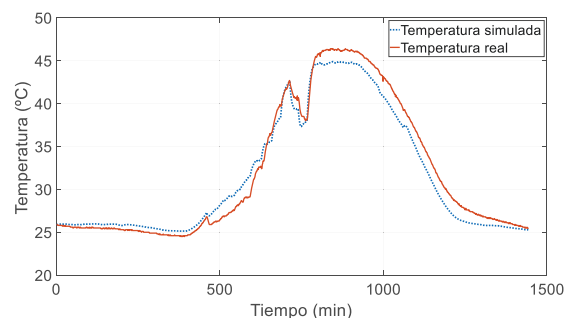


Figura 3. Validación del modelo.

Aunque los datos experimentales incluyen escalones en bucle abierto (ver fig. 2) que permitirían obtener modelos de primer orden con retardo utilizando el método de la curva de reacción, se ha preferido utilizar el modelo no lineal y linealizarlo en torno a distintos puntos de operación para el diseño de los algoritmos de control, dado que el sistema está sometido a fuertes perturbaciones. Otra opción sería la obtención de modelos tipo ARX o ARMAX y la simplificación de los mismos, como en [4].

La ecuación (1) se puede expresar como:

$$c_{ter} \frac{dX_{t,a}}{dt} - c_{rad} P_{r,e} + (\phi_v + c_{cvcb})(X_{t,a} - P_{t,e}) - c_{cvs}(X_{t,s} - X_{t,a}) = 0$$

$$f(\dot{X}_{t,a}, X_{t,a}, U, P_{t,e}, P_{v,e}, X_{t,s}, P_{r,e}) = 0 \quad (9)$$

La linealización del balance descrito por (9) sólo entraña cierta dificultad en el término relativo a  $\phi_v$ . Las variables que definen el punto de operación (se usa la notación  $\bar{\cdot}$ ) vienen definidas por la ecuación:

$$0 = c_{rad} \bar{P}_{r,e} + c_{cvs} (\bar{X}_{t,s} - \bar{X}_{t,a}) - c_{cvcb} (\bar{X}_{t,a} - \bar{P}_{t,e}) - \phi_v (\bar{X}_{t,a} - \bar{P}_{t,e}) \quad (10)$$

Las variables de desviación respecto a dicho punto de operación ( $\bar{\cdot}$ ) determinan el comportamiento del modelo lineal tras la linealización del término no lineal  $\phi_v$ . Aplicando un desarrollo en serie de Taylor a la ecuación (10) hasta los términos de primer orden (no se incluye la dependencia explícita con el tiempo para simplificar):

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial f}{\partial U} \right|_{-} &= \frac{3}{4} c_1 c_2 (\bar{X}_{t,a} - \bar{P}_{t,e}) \cdot \cos\left(\frac{\bar{U}}{2}\right) \cdot \left( c_2 \frac{(\bar{X}_{t,a} - \bar{P}_{t,e})}{\bar{P}_{t,e}} \cdot \text{sen}\left(\frac{\bar{U}}{2}\right) + c_3 \bar{P}_{v,e}^2 \right)^{\frac{1}{2}}; \\ \left. \frac{\partial f}{\partial P_{v,e}} \right|_{-} &= 3 c_1 c_3 \bar{P}_{t,e} \bar{P}_{v,e} \left( \left( c_2 \frac{(\bar{X}_{t,a} - \bar{P}_{t,e})}{\bar{P}_{t,e}} \cdot \text{sen}\left(\frac{\bar{U}}{2}\right) + c_3 \bar{P}_{v,e}^2 \right)^{\frac{1}{2}} - (c_3 \bar{P}_{v,e}^2)^{\frac{1}{2}} \right); \\ \left. \frac{\partial f}{\partial P_{t,e}} \right|_{-} &= -c_{cvcb} - c_1 \left( c_2 \frac{(\bar{X}_{t,a} - \bar{P}_{t,e})}{\bar{P}_{t,e}} \cdot \text{sen}\left(\frac{\bar{U}}{2}\right) + c_3 \bar{P}_{v,e}^2 \right)^{\frac{3}{2}} - \frac{3}{2} c_1 c_2 \frac{\bar{X}_{t,a}}{\bar{P}_{t,e}} \cdot \text{sen}\left(\frac{\bar{U}}{2}\right) \left( c_2 \frac{(\bar{X}_{t,a} - \bar{P}_{t,e})}{\bar{P}_{t,e}} \cdot \text{sen}\left(\frac{\bar{U}}{2}\right) + c_3 \bar{P}_{v,e}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\quad + c_1 (c_3 \bar{P}_{v,e}^2)^{\frac{3}{2}}; \\ \left. \frac{\partial f}{\partial X_{t,a}} \right|_{-} &= c_{cvs} + c_{cvcb} + \frac{3}{2} c_1 c_2 \cdot \text{sen}\left(\frac{\bar{U}}{2}\right) \cdot \left( c_2 \frac{(\bar{X}_{t,a} - \bar{P}_{t,e})}{\bar{P}_{t,e}} \cdot \text{sen}\left(\frac{\bar{U}}{2}\right) + c_3 \bar{P}_{v,e}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores de los parámetros descriptivos del modelo se obtiene la ecuación diferencial linealizada, que permite obtener funciones de transferencia simplificadas que relacionan las entradas (manipulable y perturbaciones) con la salida. Las funciones de transferencia que relacionan las perturbaciones con la salida permiten diseñar controladores anticipativos. Por ejemplo, para unas condiciones de operación del día 4 definidas por  $(\bar{U}; \bar{P}_{r,e}; \bar{P}_{t,e}; \bar{P}_{v,e}; \bar{X}_{t,s}) \approx (6,3; 975; 27,3; 5,2; 34,9)$ , se obtienen funciones de transferencia de primer orden con constante de tiempo  $\tau = 5,228$  [min] y las ganancias estáticas  $k_U, k_{P_{r,e}}, k_{P_{t,e}}, k_{X_{t,s}}$  y  $k_{P_{v,e}}$  indicadas a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Apertura } [^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}]: G_U(s) &= \frac{X_{t,a}(s)}{U(s)} = \frac{-0,442}{5,228s+1} \quad (12) \\ \text{Temperatura exterior } [^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}]: G_{P_{t,e}}(s) &= \frac{X_{t,a}(s)}{P_{t,e}(s)} = \frac{0,65}{5,228s+1} \\ \text{Radiación } [^{\circ}\text{C}/\text{W}/\text{m}^2]: G_{P_{r,e}}(s) &= \frac{X_{t,a}(s)}{P_{r,e}(s)} = \frac{0,011}{5,228s+1} \\ \text{Temperatura de suelo } [^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}]: G_{X_{t,s}}(s) &= \frac{X_{t,s}(s)}{X_{t,a}(s)} = \frac{0,28}{5,228s+1} \\ \text{Velocidad del viento } [^{\circ}\text{C}/\text{m}/\text{s}]: G_{P_{v,e}}(s) &= \frac{X_{t,a}(s)}{P_{v,e}(s)} = \frac{-0,526}{5,228s+1} \end{aligned}$$

No se ha apreciado la necesidad de incluir tiempos de retardo en este caso dadas las características del invernadero (de pequeña dimensión) y el tiempo de muestreo utilizado (1 min). Analizando los datos experimentales (método de la curva de reacción), se obtienen constantes de tiempo algo superiores y ganancias similares en  $G_U(s)$  [4].

$$\begin{aligned} (\dot{X}_{t,a}, X_{t,a}, U, P_{t,e}, P_{v,e}, X_{t,s}, P_{r,e}) &\approx \left. \frac{\partial f}{\partial X_{t,a}} \right|_{-} \dot{X}_{t,a} + \\ &+ \left. \frac{\partial f}{\partial X_{t,a}} \right|_{-} \bar{X}_{t,a} + \left. \frac{\partial f}{\partial U} \right|_{-} \bar{U} + \left. \frac{\partial f}{\partial P_{t,e}} \right|_{-} \bar{P}_{t,e} + \left. \frac{\partial f}{\partial P_{v,e}} \right|_{-} \bar{P}_{v,e} + \\ &+ \left. \frac{\partial f}{\partial X_{t,s}} \right|_{-} \bar{X}_{t,s} + \left. \frac{\partial f}{\partial P_{r,e}} \right|_{-} \bar{P}_{r,e} = 0 \quad (11) \end{aligned}$$

donde  $\cdot|_{-}$  indica el punto de operación en torno al cual se linealiza la ecuación. Definiendo:

$$c_1 = \left( \frac{c_{cesp,a} c_{den,a}}{c_{sup}} \right) \cdot \left( \frac{c_{lon,vent} c_{desc}}{3 c_{grav}} \right); \quad c_2 = 2 c_{grav} c_{anc,vent}; \quad \text{y } c_3 = c_{cvi} \text{ se obtiene:}$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial X_{t,a}} \right|_{-} = c_{ter}; \quad \left. \frac{\partial f}{\partial X_{t,s}} \right|_{-} = -c_{cvs}; \quad \left. \frac{\partial f}{\partial P_{r,e}} \right|_{-} = -c_{rad};$$

#### 4. ESTRATEGIAS DE CONTROL

Se han propuesto dos técnicas de control. La primera consiste en un control PI+anti-windup+FF, basado en la linealización del modelo matemático en torno a un punto de operación fijo con compensación de perturbaciones con control anticipativo (FF, *feedforward*). Dado que las funciones de transferencia obtenidas de la linealización del modelo no lineal tienen el mismo denominador, los controladores anticipativos están formados por el cociente de las ganancias de las funciones de transferencia de las perturbaciones entre los de la función de transferencia que relaciona la apertura de ventilación con la temperatura exterior:  $F_{ff}(s) = P(0)/G(0)$  en figura 4. El controlador PI en configuración ideal [13]:

$$C(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (13)$$

se calcula con el método de cancelación polo-cero ( $T_i = \tau$ ) y una constante de tiempo en bucle cerrado  $\tau_{bc} = 0,2\tau$  ( $K = 1/(0,2k)$ ).

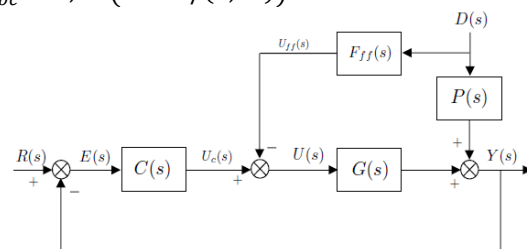


Figura 4. Esquema clásico de control anticipativo [4].

La segunda estrategia se basa en un control por linealización por realimentación (FL, *feedback linearization*), teniendo en cuenta que el sistema tiene grado relativo 1 y asimilando el sistema linealizado a un integrador. Se escoge una señal de control virtual  $v$  de tal forma que

$$c_{ter} \frac{dX_{t,a}}{dt} = v \tag{14}$$

con lo que se obtiene un integrador, que en general se puede controlar mediante un controlador proporcional para el problema de seguimiento de referencias (de nuevo por el método de cancelación de polos imponiendo la misma  $\tau_{bc}$  que en el esquema previo,  $K = c_{ter,a}/\tau_{bc}$ ), pero para rechazo de perturbaciones es conveniente que el controlador incluya acción integral, por lo que se implementa como en el caso anterior un PI calculando el tiempo integral aplicando el método SIMC [12] ( $T_i = 4\tau_{bc}$ ). Las limitaciones en

la señal de control  $U$  (apertura de ventilación) se convierten en restricciones en la señal de control virtual que varían en el tiempo, puesto que dependen de las perturbaciones y la temperatura. Dichas señales  $v_{min}(t)$  y  $v_{max}(t)$  se pueden obtener sustituyendo  $U$  en (14) por  $U_{max}$  y  $U_{min}$  respectivamente (transformación o mapeo de restricciones), como se muestra en (15). La señal de control real en este caso se calcula a partir de la virtual usando (16). Hay que hacer notar que se podría haber escogido  $v = -\Phi_v(X_{t,a} - P_{t,e})$ , en cuyo caso en vez de un integrador como en (14), la linealización por realimentación habría dado lugar a un sistema en la señal de control virtual descrito por  $X_{t,a}(s) = G_v(s)V(s) + G_r(s)P_{r,e}(s) + G_e(s)P_{t,e}(s) + G_s(s)X_{t,s}(s)$ . Habría que mantener en el esquema de control los controladores anticipativos analizados en el esquema de control PI y sólo las perturbaciones relacionadas con el flujo de ventilación serían tratadas por el controlador FL

$$v_{max,min} = c_{rad}P_{r,e} - c_{cvcb}(X_{t,a} - P_{t,e}) + c_{cvs}(X_{t,s} - X_{t,a}) - P_{t,e} \left( \frac{c_{den,a}c_{cesp,a}}{c_{sup}} \right) \cdot \left( \frac{c_{lon,vent}c_{desc}}{3c_{grav}} \right) \tag{15}$$

$$\cdot \left[ \left( \frac{(X_{t,a} - P_{t,e})}{P_{t,e}} c_{grav} 2 c_{anc,vent} \cdot \text{sen} \left( \frac{U_{min,max}}{2} \right) + c_{cvi}P_{v,e}^2 \right)^{\frac{3}{2}} - (c_{cvi}P_{v,e}^2)^{\frac{3}{2}} \right]$$

$$U = 2 \cdot \arcsen \left( \frac{\left( \left( \frac{v - c_{rad}P_{r,e} - c_{cvcb}P_{t,e} - c_{cvs}X_{t,s} + X_{t,a}(c_{cvs} + c_{cvcb})}{-\left( \frac{c_{den,a}c_{cesp,a}c_{lon,vent}c_{desc}}{3c_{sup}c_{grav}} \right) P_{t,e}} + (c_{cvi}P_{v,e}^2)^{\frac{3}{2}} \right) - c_{cvi}P_{v,e}^2 \right) \cdot P_{t,e}}{2c_{grav}c_{anc,vent} \cdot (X_{t,a} - P_{t,e})} \right) \tag{16}$$

### 5. RESULTADOS EN SIMULACIÓN

En los esquemas explicados en la sección previa se han impuesto especificaciones agresivas. Se han barrido varios puntos de operación para poner de manifiesto las características de las estrategias de control en términos de seguimiento de referencias y de rechazo de perturbaciones. Las fig. 5 y 6 muestran la comparación de las dos estrategias sin considerar errores de modelado. Hay que hacer notar que, aunque en los invernaderos comerciales habitualmente no se llevan a cabo tantos cambios de consigna durante la operación diurna, en este caso la curva de referencia sigue un patrón similar a la evolución de la radiación solar y la temperatura exterior, porque de no ser así la señal de control estaría saturada durante gran parte de la operación. Estos cambios de consigna se llevan también a cabo cuando se controla simultáneamente la humedad, para evitar que esta variable supere niveles que puedan dar lugar a la aparición de enfermedades o plagas en el cultivo. La fig. 5 muestra un buen comportamiento del PI+*anti-windup*+FF en la zona de operación para la cual el modelo ha sido linealizado,

si bien a temperaturas más bajas (baja radiación) el comportamiento empeora. La fig. 6 muestra el resultado de la técnica FL, con las mejores prestaciones, como era esperable. La fig. 7 muestra el caso en que se introduce incertidumbre en todos los parámetros que han sido calibrados con algoritmos genéticos ( $c_{rad}$ ,  $c_{cvs}$ ,  $c_{cvcb}$ ,  $c_{desc}$ ,  $c_{cvi}$ ), multiplicando su valor por 0.9 y 1.1 en el modelo de simulación. La fig. 8 muestra los resultados alcanzados simulando el paso de nubes durante 60 minutos (a partir del muestreo 760, correspondiente a las 12.66 hora local decimal), para comprobar las prestaciones en rechazo de perturbaciones. En todos los casos hay periodos en los que el actuador está saturado, funcionando en su caso el mecanismo *anti-windup* (PI) y/o el mapeo de restricciones. Para analizar de forma cuantitativa los resultados se han utilizado los índices clásicos de comportamiento IAE, ISE, ITAE e ITSE, a los que se ha añadido una medida del esfuerzo de control, calculada como [6]:

$$EC = \sum_{t_0}^{t_{fin}} |u(t) - u(t-1)| \tag{17}$$

La tabla 1 muestra los valores normalizados de los índices (tomando como 1 el menor) en los casos nominal y con incertidumbres. En el caso de paso de nubes, el FL también proporciona los menores índices (salvo en el caso de EC cuyo valor es 1,578) y los valores relativos para el PI son: IAE=1,163, ISE=1,005, ITAE=1,163 e ITSE=1,005. Los resultados confirman lo observado y esperado, y es

que la estrategia FL es más agresiva, consiguiendo mejor rechazo de perturbaciones (implícito) y tiempos de respuesta. Se esperaba que esta técnica fuera muy sensible a las incertidumbres de modelado, pero sin embargo ha mostrado un buen comportamiento. Es de esperar que en invernaderos industriales de mayor tamaño, con presencia de tiempos de retardo la técnica no será tan adecuada.

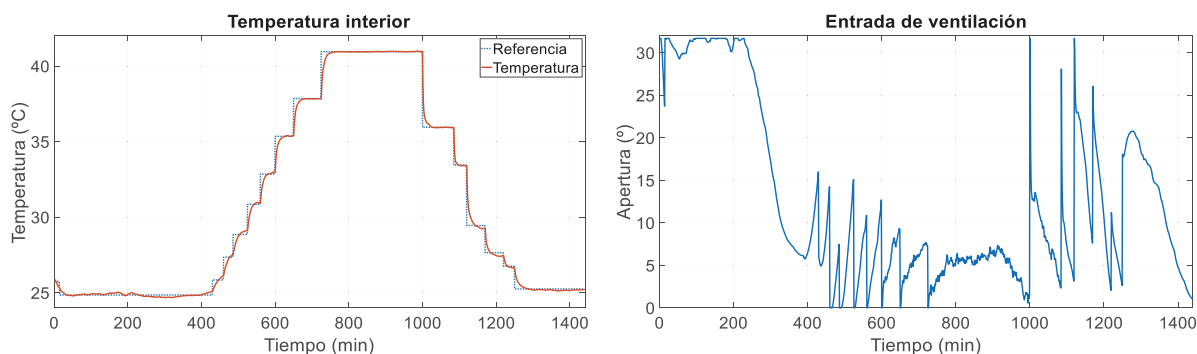


Figura 5: Control de temperatura mediante PI+anti-windup+FF (día 4).

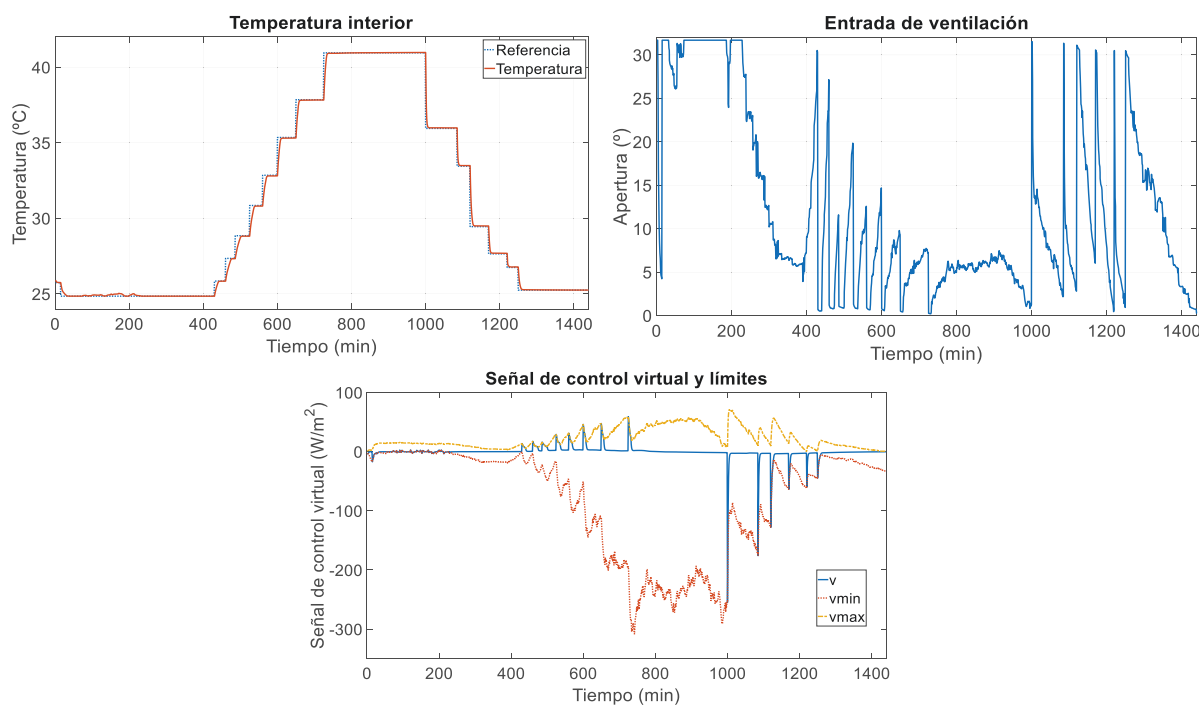


Figura 6: Control de temperatura mediante linealización por realimentación (día 4).

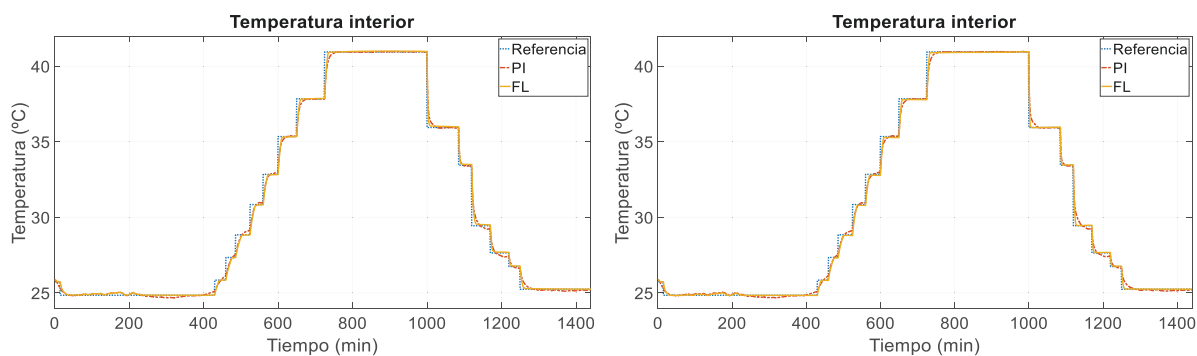


Figura 7: Comparación en presencia de errores de modelado (día 4). Izquierda: todos los parámetros multiplicados por 0.9. Derecha: todos los parámetros multiplicados por 1.1.

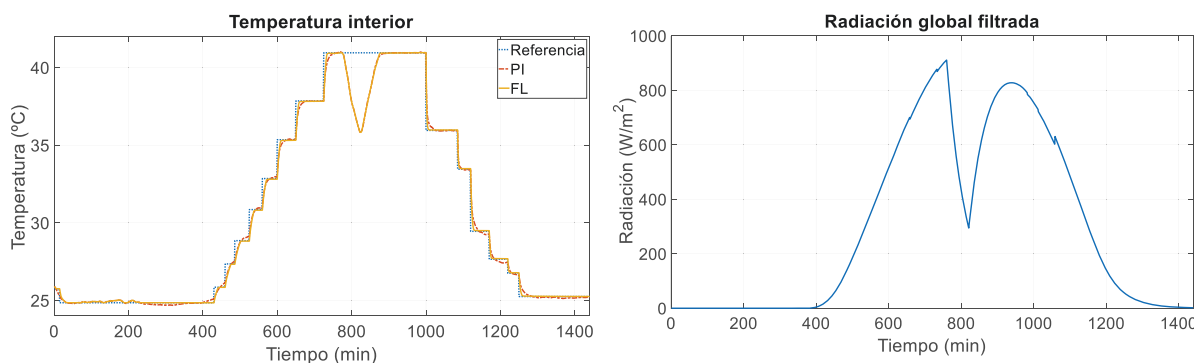


Figura 8: Comparación en presencia de nubes (día 4).

Tabla 1: Principales indicadores de funcionamiento.

PI+FF: PI+*anti-windup*+FF. FL: linealización por realimentación.

Con incertidumbre: PI0.9, PI1.1, FL0.9 y FL1.1.

	PI+FF	FL	PI+FF0.9	PI+FF1.1	FL0.9	FL1.1
IAE	1,417	1,062	1,584	1,514	1,238	1,000
ISE	1,117	1,069	1,191	1,088	1,163	1,000
ITAE	1,505	1,062	1,584	1,514	1,238	1,000
ITSE	1,117	1,069	1,191	1,088	1,163	1,000
EC	1,004	1,569	1,000	1,013	1,564	1,575

## 6. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

En este trabajo se ha realizado el modelado y control de la temperatura interna en un invernadero controlado con ventilación natural. Se han utilizado datos de cinco días reales de operación para la calibración de los parámetros del modelo y la simulación de los algoritmos de control.

El sistema presenta una dinámica fuertemente no lineal y está sometido a perturbaciones medibles, fundamentalmente la radiación solar, la temperatura ambiente exterior y la velocidad del viento, así como la temperatura del suelo. Esto hace que la dinámica dependa mucho de la época del año y de las condiciones climáticas exteriores.

Desde el punto de vista de modelado, se han realizado contribuciones en dos vertientes. Por una parte y basándose en la literatura existente, se ha llevado a cabo un modelado basado en primeros principios (balances de energía y masa) para obtener una ecuación diferencial no lineal que relaciona la temperatura interna con las principales perturbaciones, la entrada manipulable (apertura de ventilación) y los parámetros que definen al invernadero en el que se han realizado los ensayos. Algunos de estos parámetros han sido calibrados usando datos experimentales y optimización por algoritmos genéticos (minimizando el error cuadrático). Este modelo no lineal se ha linealizado

para poder obtener funciones de transferencia que permitan describir el funcionamiento del sistema en torno a un punto de operación definido por las condiciones de contorno (valor de estado estacionario o cuasi-estacionario de las perturbaciones y de la entrada manipulable).

Una vez finalizada la etapa de modelado, se ha llevado a cabo el diseño de dos estrategias de control, habiendo desarrollado controladores tipo PI+*anti-windup* incluyendo controladores anticipativos para compensación de perturbaciones y una estrategia de control no lineal basada en la técnica de linealización por realimentación. Se ha comprobado el funcionamiento de ambos controladores en simulación, usando para ello el modelo no lineal obtenido y se ha realizado un análisis de la influencia de incertidumbres de modelado y fuertes perturbaciones en el comportamiento de los esquemas de control.

En general, se puede considerar que el comportamiento de los dos algoritmos de control ha sido satisfactorio, siendo el más completo el basado en la técnica de linealización por realimentación, pues permite tener en cuenta la característica no lineal de la planta y la presencia de perturbaciones, proporcionando señales de control de mayor amplitud que la técnica de control lineal y siendo necesario implementar un mecanismo de transformación de restricciones en línea. Los trabajos futuros se van a centrar en calibrar de nuevo los modelos y ensayar los algoritmos de control diseñados en la instalación AgroConnect del convenio UAL-IFAPA.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido cofinanciado con el proyecto CARBON4GREEN: Optimización de sistema integral de calefacción y enriquecimiento carbónico en invernaderos. Convocatoria 2018 de Proyectos I+D+i en el Marco del Programa Operativo FEDER-Andalucía 2014-2020, UAL18-TEP-A055-B. El autor Francisco García Mañas es beneficiario de una ayuda FPU del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

# GREENHOUSE CLIMATE CONTROL WITH COMPENSATION OF MEASURABLE DISTURBANCES

## Abstract

*This paper presents the design of greenhouse climate control techniques through natural ventilation, exploiting measurable disturbances and taking into account operational constraints. A greenhouse constitutes an ideal plant for crop growth, since it is an enclosed environment where climate and fertigation variables can be controlled by climatic actuators. This work describes the nonlinear model used to simulate the greenhouse behavior using real data, its calibration, and the development of control techniques that make use of linearized models around operating points or the full nonlinear model (feedback linearization), comparing them.*

**Keywords:** PID control, feedforward control, feedback linearization, greenhouse.

## Referencias

[1] Chen Lijun, C., Du, S. Liang, M., He, Y. Adaptive feedback linearization-based predictive control for greenhouse temperature, *IFAC-PapersOnLine*, 51(17), 784-789, 2018. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.100.

[2] Cunha, J.B., Couto, C., Ruano, A. Real-time parameter estimation of dynamic temperature models for greenhouse environmental control. *Control Engineering Practice*, 5, 1473-1481, 1997, doi: 10.1016/S0967-0661(97)00145-7.

[3] Davis, P. A technique of adaptive control of the temperature in a greenhouse using ventilator adjustments. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 29, 241-248, 1984.

[4] García-Mañas, F., Guzmán, J.L., Rodríguez, F., Berenguel, M., Häggglund, T. Experimental evaluation of feedforward tuning rules. *Control Engineering Practice*, 114, 104877, 2021, doi: 10.1016/j.conengprac.2021.104877.

[5] Hoyo, A., Moreno, J.C., Guzmán, J.L., Rodríguez, F. Robust QFT-Based feedback linearization controller of the greenhouse diurnal temperature using natural ventilation, *IEEE Access*, 7, 64148-64161, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2916412.

[6] Montoya-Rios, A.P., García-Mañas, F., Guzmán, J.L., Rodríguez, F. Simple tuning rules for feedforward compensators applied to greenhouse daytime temperature control using natural ventilation. *Agronomy*, 10, 1327, 2020, doi:10.3390/agronomy10091327.

[7] Piñón, S., Camacho, E.F., Kuchen, B., Peña, M. Constrained predictive control of a greenhouse, *Computers and Electronics in Agriculture*, 49(3), 317-329, 2005, doi: 10.1016/j.compag.2005.08.007.

[8] Rodríguez, F., Berenguel, M., Arahal, M.R. Feedforward controllers for greenhouse climate control based on physical models, *European Control Conference*, ECC 2001, 2158-2163, 2001, doi: 10.23919/ecc.2001.7076243.

[9] Rodríguez, F. Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero. Tesis Doctoral. Universidad de Almería, 2002.

[10] Rodríguez, F.; Berenguel, M.; Guzmán, J.L.; Ramírez-Arias, A. Modeling and control of greenhouse crop growth; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2015.

[11] Setiawan, A., Albright, L.D., Phelan, R.M. Simulation of greenhouse air temperature control using PI and PDF algorithms. *IFAC Proceedings Volumes*, 31, 111-117, 1998, doi: 10.1016/S1474-6670(17)36050-0.

[12] Skogestad, S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control* 13, 291-309, 2003, doi: 10.1016/S0959-1524(02)00062-8.

[13] Vilanova, R., Alcántara, S. y Pedret, C. Sintonía de controladores PID: un enfoque analítico basado en el moldeo de la función de sensibilidad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 18(4), 313-326, 2021, doi: 10.4995/riai.2021.15422.

## Anexo 1. Principales parámetros del modelo

Nombre	Parámetro	Valor	Unidad
Coefficiente de radiación	$c_{rad}$	0,1979	-
Coefficiente de convección con el suelo	$c_{cvs}$	4,9622	$\frac{W}{m^2K}$
Coefficiente de transferencia de calor con la cubierta	$c_{cvcb}$	8,9719	$\frac{W}{m^2K}$
Coefficiente de efecto viento	$c_{cvi}$	0,0989	-
Coefficiente de descarga	$c_{desc}$	0,664	-
Longitud de la ventilación	$c_{lon,vent}$	40	m
Aceleración de la gravedad	$c_{grav}$	9,8	$\frac{m}{s^2}$
Densidad del aire	$c_{den,a}$	1,197	$\frac{kg}{m^3}$
Calor específico del aire	$c_{cesp,a}$	1007	$\frac{J}{kg K}$
Superficie del invernadero	$c_{sup}$	1500	$m^2$
Ancho de la ventilación	$c_{anc,vent}$	1,925	m
Volumen del invernadero	$c_{vol}$	6995	$m^3$



© 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>).