

LABORATORIO VIRTUAL PARA LA ENSEÑANZA DE CONTROL CLIMÁTICO DE INVERNADEROS

J. L. Guzmán¹, F. Rodríguez¹, M. Berenguel¹, S. Dormido²

¹Dpto. Lenguajes y Computación. Universidad de Almería.
Ctra. Sacramento s/n, Almería 04120
Email: [joguzman, frrodrig, beren]@ual.es

²Dpto. Informática y Automática. UNED
C/. Juan del Rosal 19, Madrid 28040
Email: sdormido@dia.uned.es

Resumen: Este trabajo presenta un laboratorio virtual para la enseñanza del control climático de invernaderos. Con este tipo de herramientas se tiene como objetivo conseguir la abstracción de trabajos de investigación consolidados con el fin de que puedan ser utilizados por los estudiantes de forma sencilla y transparente. Concretamente la herramienta desarrollada en este artículo aporta un modelo completo de invernadero con un conjunto de controladores específicos, todo ello accesible a través de una interfaz gráfica estructurada. De esta forma se permite a los alumnos poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos en clase sin restricciones espacio-temporales. Copyright © 2005 CEA-IFAC

Palabras Clave: educación en control, agricultura, simulación, enseñanza de laboratorio.

1. INTRODUCCIÓN

Como ya es bien conocido la agricultura y más concretamente el cultivo bajo invernadero es uno de los motores económicos principales de la ciudad de Almería, algo que ha llevado a consolidar los estudios de agronomía como una de las referencias principales de la universidad almeriense. En la formación de un ingeniero técnico agrícola o ingeniero agrónomo es fundamental hoy día poseer conocimientos relacionados con modelado y control, debido a la presencia, cada día más frecuente, de sistemas de control automático en los invernaderos. Es por ello que desde el área de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Almería se está apostando fuertemente en mejorar la docencia en este campo,

trasladando los avances obtenidos en los campos de modelado y control gracias a las nuevas tecnologías. En estos últimos años se ha observado un aumento significativo en el desarrollo de proyectos y trabajos de investigación orientados a la mejora de la educación en automática. Lo que se trata en Dormido (2004) como trabajos futuros sobre la educación en control se acerca cada día más a la realidad, y son ya innumerables los trabajos que se pueden encontrar sobre interactividad, simulación basada en web, laboratorios virtuales, laboratorios remotos, etc... (Dormido y Esquembre, 2003; Guzmán *et al.*, 2005a; Martín *et al.*, 2004; Sánchez *et al.*, 2002) que componen un amplio abanico de posibilidades para los estudiantes como herramientas de apoyo para su formación.

Algunos de estos grandes avances ya han sido incorporados en la docencia sobre control de invernaderos, como laboratorios remotos (Guzmán *et al.*, 2005b) y cursos virtuales (Rodríguez *et al.*, 2005), los cuales están siendo utilizados en la actualidad para la enseñanza de estudios de segundo y tercer ciclo respectivamente. Con el fin de continuar avanzando en este campo, y como complemento a los trabajos anteriores, este artículo presenta un laboratorio virtual para el control climático de invernaderos. Es una herramienta que ha sido desarrollada con *Easy Java Simulations* (Esquembre, 2002) y haciendo uso de los resultados de investigación sobre modelado y control de invernaderos obtenidos en Rodríguez (2002). Dicha herramienta permitirá a los alumnos poner en práctica los conocimientos obtenidos en clase desde cualquier lugar con conexión a Internet y a cualquier hora del día. Con esta herramienta se complementan los trabajos comentados anteriormente de forma que es posible obtener conocimientos teóricos a través de un curso virtual, posteriormente ponerlos en práctica sobre el laboratorio virtual y finalmente consolidarlos sobre la maqueta de invernadero remotamente.

La estructura del artículo se presenta como sigue: en la sección 2 se tratan los conceptos relacionados con el control de invernaderos. En la siguiente sección se describe el modelo de invernadero utilizado y en la sección 4 las principales características de la herramienta. La sección 5 presenta un conjunto de ejemplos típicos de control climático y finalmente se exponen las conclusiones obtenidas.

2 CONTROL CLIMÁTICO DE INVERNADEROS

2.1. Problema del control del clima en el interior de un invernadero

La producción del cultivo bajo invernadero es influenciada por el clima en su interior por lo que hay que mantener las variables que lo caracterizan dentro de un determinado rango de valores. En este problema de control intervienen las siguientes variables (figura 1): variables a controlar (radiación PAR, la temperatura, humedad relativa del aire y concentración de CO₂, aunque esta última no se ha considerado en la herramienta ya que no es usual su control en la zona mediterránea), variables de control (los actuadores más comunes en la zona mediterránea son ventilación natural, malla de sombreo, calefacción), variables de perturbación (clima en el exterior, el cultivo y el estado de otros elementos del invernadero como cubierta y suelo).

Analizando este problema de control se deducen las siguientes características (Rodríguez y Berenguel, 2001a):

- El sistema se encuentra sometido a fuertes perturbaciones medibles y no medibles.
- Existe un alto grado de correlación entre las variables a controlar.
- Para controlar la temperatura y humedad se utilizan los mismos sistemas de actuación.
- Es un sistema variable en el tiempo en el que los parámetros que caracterizan a los sistemas de actuación y determinan su efecto, se ven afectados por las perturbaciones.
- El sistema presenta restricciones en las señales de entrada con una saturación en amplitud y, en velocidad de los sistemas de actuación. Otra no-linealidad que aparecen en estas instalaciones es la cuantización, debido a su estructura mecánica.
- Aunque la dinámica del crecimiento del cultivo presenta una escala de tiempo diferente de la dinámica del clima del invernadero, las plantas necesitan encontrarse en un ambiente apropiado para su crecimiento. Por tanto, el problema del control climático presenta restricciones variables en el tiempo, ya que el cultivo pasa por varias fases en las que necesita distintas exigencias climáticas.

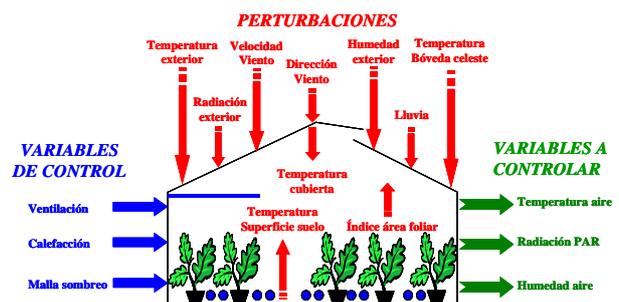


Fig. 1. Variables del control climático

Después de analizar todas estas características se ha optado por considerar dos lazos de control independientes tal y como se describirá en los siguientes apartados: uno para controlar la radiación PAR y otro para la temperatura y humedad.

2.2. Control de la temperatura

Problema del control de temperatura. La temperatura es una de las variables climáticas de las que influyen directamente sobre el crecimiento del cultivo que han sido controladas tradicionalmente en los invernaderos, ya que las estructuras existentes y los sistemas de actuación instalados lo permitían. Una planta sólo crece bajo la influencia de la luz, es decir, cuando realiza la fotosíntesis, requiriendo además una temperatura relativamente alta. Durante la noche el cultivo no se encuentra activo por lo que no es necesario mantenerlo a una temperatura elevada. Por tanto, es conveniente una temperatura más alta durante el día que durante la noche. Por otra parte, el control de la temperatura se realiza utilizando la ventilación para disminuir la temperatura y la calefacción para elevarla, por lo

que se definen dos consignas: la de ventilación por encima de la cual habría que abrir la misma, y la de calefacción por debajo de la cual, habría que empezar a utilizarla. De esta forma, es posible definir cinco periodos del día con distintas consignas tal y como se muestra en la figura 2. Como se puede observar, existe un intervalo de temperatura permitido donde no funcionaría ningún actuador.

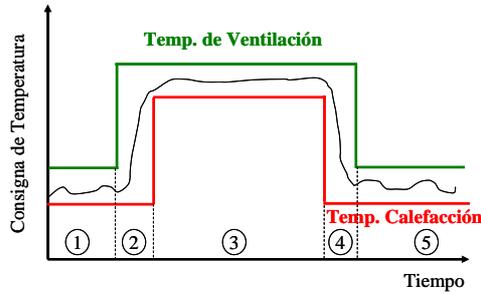


Fig. 2. Periodos de consigna de temperatura

Control de la temperatura mediante ventilación natural. La ventilación natural proporciona un intercambio de aire entre el interior y el exterior del invernadero disminuyendo la temperatura del mismo. El controlador debe calcular la apertura de la ventilación necesaria para alcanzar la consigna deseada. Este problema de control presenta las siguientes características: estructuralmente el sistema de actuación presenta no linealidades (saturación, velocidad de movimiento y la resolución de la salida); la respuesta de la temperatura del aire interior frente a escalones en la ventilación se comporta como un sistema de primer orden con retardo, pero con una naturaleza no lineal en función del punto de trabajo ante las mismas perturbaciones; las perturbaciones externas influyen notablemente en el efecto de la ventilación ya que modifican el efecto convectivo del actuador.

La solución más adoptada comercialmente es un controlador adaptativo que modifica su comportamiento cuando el sistema o las perturbaciones cambian, concretamente con ajuste por tabla. La relación entre la temperatura del aire exterior y la temperatura del aire interior a través de la ventilación es conocida, cumpliéndose que a menor temperatura exterior más disminuye la temperatura del invernadero. Con respecto a la velocidad del viento, su efecto es el contrario ya que a mayor velocidad de viento se favorece la renovación de aire. Por tanto, la ganancia del controlador en función de estas dos variables debería ser como se muestra en el ejemplo de la figura 3, donde $c_{kpven,max}$ es el valor máximo del término proporcional [$^{\circ}$ apertura/ $^{\circ}$ C], $c_{kpven,min}$ es el valor mínimo del término proporcional [$^{\circ}$ apertura/ $^{\circ}$ C], $c_{tvenmin,vmin}$ es la temperatura exterior mínima de apertura sin viento (0 m/s) [$^{\circ}$ C], $c_{tvenmin,vmax}$ es la temperatura exterior mínima de apertura con viento máximo permitido ($C_{vv,max}$ [m/s]) [$^{\circ}$ C], $c_{tvenmax,vmin}$ es la temperatura exterior para apertura máxima sin

viento (0 m/s) [$^{\circ}$ C] y $c_{tvenmax,vmax}$ es la temperatura exterior para apertura máxima con viento máximo permitido ($C_{vv,max}$ [m/s]) [$^{\circ}$ C]. El mayor inconveniente de este tipo de algoritmo es el diseño de la función que relacione los parámetros del controlador con las variables que se miden, ya que hay que probar gran cantidad de condiciones de operación y comprobar el buen funcionamiento del sistema con numerosas simulaciones. Además, hay que indicar que cada estructura de invernadero y cada tipo de ventilación presentarán unos parámetros óptimos de funcionamiento distintos.

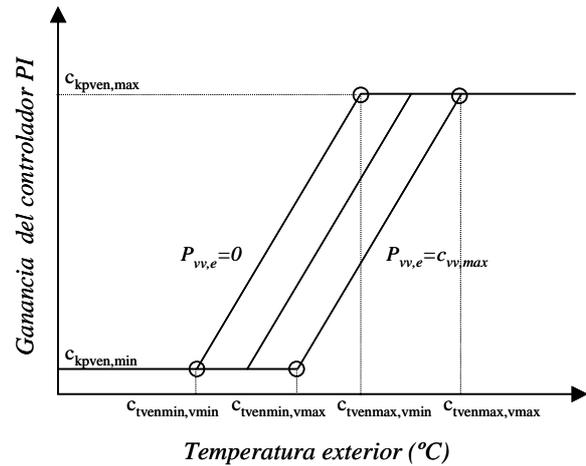


Fig. 3. Función para el cálculo de la ganancia del controlador.

Control de la temperatura mediante sistemas de calefacción. El sistema de calefacción está compuesto por un conjunto de tuberías de acero repartidas por toda la superficie del invernadero que son calentadas debido a la circulación de agua por su interior y éstas a su vez por convección transmiten calor al aire y por radiación transmiten calor al resto de sólidos calentándolos, por lo que éstos, a su vez, transmiten calor al aire por convección al encontrarse en contacto con él. Estos fenómenos físicos hacen que se eleve la temperatura del aire interior del invernadero. El problema de control de la temperatura del aire utilizando calefacción radica en calcular la temperatura a la que debe encontrarse el agua que circula por las tuberías para mantener la temperatura del aire en el valor deseado. Para ello se dispone de una válvula de tres vías que mezcla el agua calentada por la caldera, que es de temperatura constante, con el agua a menor temperatura que proviene del retorno del circuito de tuberías, obteniéndose la temperatura de agua deseada. Por tanto se trata de un sistema de control en cascada. Además, el sistema de control debe gobernar otros dispositivos como el quemador de la caldera y las bombas que producen la recirculación del agua por las tuberías, que son señales discretas del tipo encendido/apagado.

Por otra parte, se trata de un sistema de actuación con saturación ya que la temperatura del agua que

circula por las tuberías no puede ser mayor que la que produce la caldera. Operativamente, se fija a un nivel inferior, para evitar las oscilaciones que se producen en la caldera ya que la temperatura del agua no es completamente constante. Por otra parte, se considera que la temperatura del agua de las tuberías no puede ser menor que la del aire del invernadero, ya que en caso contrario el aire cedería calor hasta que se equilibraran, por tanto el límite inferior de la saturación es variable. Tal y como se indica en la figura 4, se utiliza un mecanismo *antiwindup* clásico para evitar el problema que la saturación del actuador induce en la acción integral; concretamente con la temperatura de las tuberías que se ha considerado no puede ser mayor de 60 °C, ni menor que la temperatura interior del invernadero (saturación inferior variable).

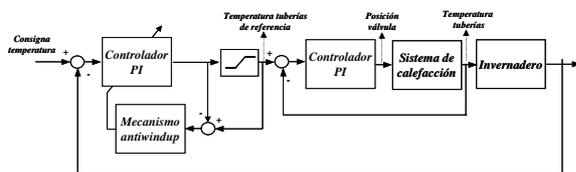


Fig. 4. Esquema de control de la temperatura con calefacción

2.3. Control de la humedad relativa diurna

El contenido de vapor de agua en el aire interior del invernadero no es una de las variables climáticas que afectan directamente al crecimiento del cultivo, aunque su control tiene un interés especial ya que humedades elevadas favorecen la aparición y desarrollo de enfermedades, además de disminuir la transpiración, y con humedades bajas, la tasa de transpiración crece, lo que puede acarrear estrés hídrico, el cierre de los estomas y, por tanto, la reducción de la fotosíntesis. Es necesario mantener la humedad relativa del aire en un intervalo determinado. El control de la humedad relativa del aire interior del invernadero presenta dos inconvenientes principales: la temperatura del aire y su humedad relativa se encuentran altamente relacionadas de forma inversa, por lo que una variación en una de las dos variables produce una variación inversa en la otra; y los actuadores que se utilizan para controlar la temperatura son los mismos que se utilizan para controlar la humedad, por lo que una acción de uno de ellos, modifica el valor de las dos variables.

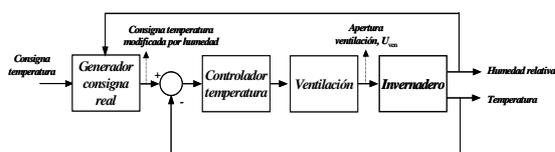


Figura 5. Generador de consignas con humedad

Como la variable principal del sistema es la temperatura del aire ya que afecta directamente al crecimiento de las plantas, se considera que es la

variable a controlar, tratando de mantener la humedad en un intervalo considerado como ideal, adaptando el controlador según los efectos de la ventilación y la calefacción sobre la humedad. Realmente, no se controla la humedad relativa del aire interior, en el sentido de seguir una consigna, sino que se intenta que se mantenga dentro de unos límites. La solución adoptada consiste en modificar la consigna de temperatura en función de la humedad relativa, como se muestra en la figura 5, donde como controlador de realimentación de temperatura de aire puede utilizarse cualquiera de los descritos en los apartados anteriores.

En el generador de consigna se define una humedad relativa de referencia, que sería la deseable a obtener en el caso de que la temperatura del aire del invernadero fuera igual a la consigna de temperatura deseada. Si la humedad relativa real es mayor que la óptima deseada, se disminuye el valor de la consigna de temperatura para adelantar la apertura de ventilación, y así se evacue el vapor de agua lo antes posible. En caso de ser muy baja, se aumenta el valor de la consigna de temperatura para retrasar la apertura de ventilación y mantener el vapor de agua que se encuentra en el interior. Evidentemente, estas variaciones de la consigna de temperatura están limitadas dentro de un intervalo, ya que es la variable principal a controlar y no se puede permitir que tome cualquier valor. Por tanto, la relación la consigna de temperatura y la humedad relativa es lineal como se muestra en la figura 6. Por tanto, habría que definir tres parámetros para el generador de consignas: la influencia máxima de la humedad sobre la consigna de temperatura, humedad relativa de influencia en la consigna de temperatura (límite a partir del cual se tiene en cuenta el efecto de la humedad sobre la temperatura), y máxima desviación de humedad relativa (rango de variación del límite de humedad influyente sobre la temperatura). Por ejemplo para una temperatura de ventilación de 20 °C, la humedad relativa óptima de un 70 %, la Influencia máxima de la humedad en la Temperatura de ventilación de 4 °C, y la relación lineal entre $\pm 20\%$ respecto a la humedad relativa óptima, la función que genera la consigna real de ventilación en base a la humedad relativa se muestra en la figura 6.

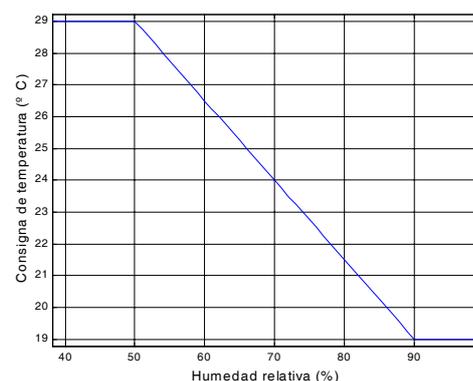


Fig. 6. Función de generación de consignas

De esta forma, la temperatura de ventilación se aumenta o disminuye linealmente hasta un máximo de 4 °C en función de la humedad relativa, estando limitados los límites de humedad al 90 % y 50 %. En base a la prioridad deseada a la temperatura o a la humedad relativa sería necesario modificar esta función.

2.4. Control de la radiación

El único método activo que se utiliza en la zona mediterránea para controlar la radiación solar es la malla de sombreado que reduce la transmisión de la radiación hacia el cultivo y el suelo provocando dos efectos: reducción de la radiación PAR, ralentizando el crecimiento del cultivo por la disminución de la actividad de fotosíntesis. La malla de sombreado es un sistema de actuación discontinuo, ya que o se encuentra recogida o extendida. Aunque su funcionamiento real permite que alcance cualquier posición ya que se trata de un motor que la extiende o recoge, no tiene sentido sombrear sólo parte de la superficie del invernadero ya que el cultivo no crecería uniformemente. Por esta razón, se utiliza un controlador todo/nada con una corrección de zona muerta en torno a la consigna de radiación para evitar el funcionamiento frecuente de los motores, ya que se pueden averiar. Se busca, así, una situación de compromiso entre alcanzar el valor deseado y las activaciones de los motores.

3. MODELO UTILIZADO EN LA HERRAMIENTA

Para el desarrollo de la herramienta que se presenta en este artículo y poder poner en práctica los algoritmos de control presentados en la sección anterior, es necesaria la utilización de un modelo del clima que se genera en el interior de un invernadero. En este apartado se describirán las principales características del modelo desarrollado.

3.1. Descripción general del modelo

Aunque se han desarrollado modelos utilizando distintas técnicas (neuronales (Rodríguez *et al.*, 1999); modelos lineales (Rodríguez y Berenguel, 2001b)) se ha optado por un modelo basado en principios físicos (Rodríguez, 2002) ya que proporcionan una información más detallada sobre el proceso en cuestión y van a permitir una mejora de la herramienta desarrollada, de forma que se podrá utilizar para el diseño de algoritmos de control en distintas estructuras de invernadero y con diferentes actuadores. El clima que se genera en un invernadero se describe por un modelo dinámico representado en su forma general por la siguiente ecuación:

$$\frac{dX}{dt} = f(X, U, P, V, C, t) \text{ con } X(t_b) = X_b$$

donde, $X(t)$ es un vector n-dimensional de variables de estado, $U(t)$ es un vector m-dimensional de variables de entrada, $P(t)$ es un vector o-dimensional de perturbaciones, $V(t)$ es un vector p-dimensional de variables propias del sistema, C es un vector q-dimensional de constantes del sistema, t es el tiempo, X_b es el estado inicial que se considera fijo y t_b es el tiempo de inicio. La función $f: \mathbb{R}^{n+m+o+p+q} \rightarrow \mathbb{R}^n$ es una función no lineal. El número de ecuaciones que describen al sistema y sus características dependen de los elementos en los que se divide al invernadero, los sistemas de actuación instalados y el tipo de método de cultivo. El modelo desarrollado para esta herramienta corresponde a un típico invernadero localizado en zona mediterránea, asumiendo las siguientes hipótesis:

- El invernadero se ha dividido en cuatro elementos: cubierta, aire en el interior, superficie del suelo y una capa de suelo a 30 cms.
- Las variables de estado del sistema son la temperatura del aire, humedad del aire, temperatura de la cubierta, temperatura de la superficie del suelo, temperatura de la primera capa de suelo y la radiación PAR.
- Existen cuatro sistemas externos que interaccionan con el sistema invernadero: aire exterior, bóveda celeste, segunda capa de suelo y balsas del sistema de riego.
- Las perturbaciones que actúan sobre el sistema son las comentadas anteriormente.
- Las entradas de control del sistema son la posición de las ventilaciones, la posición de la malla de sombreado y la temperatura del agua que circula por las tuberías del sistema de calefacción.
- Los modelos de temperatura se basan en balances de transferencia de calor donde se consideran los siguientes procesos: absorción de radiación solar, convección, conducción, intercambio de calor con el exterior debido a ventilación y a pérdidas por infiltración, absorción de radiación térmica, calor latente por condensación y evaporación y procesos de transpiración del cultivo.
- El modelo de humedad del aire se basa en una ecuación de balance de vapor de agua en el que se considera el proceso de intercambio de vapor de agua con el exterior por ventilación y pérdidas por infiltración, la transpiración del cultivo y los procesos de condensación y evaporación en las distintas superficies del invernadero.

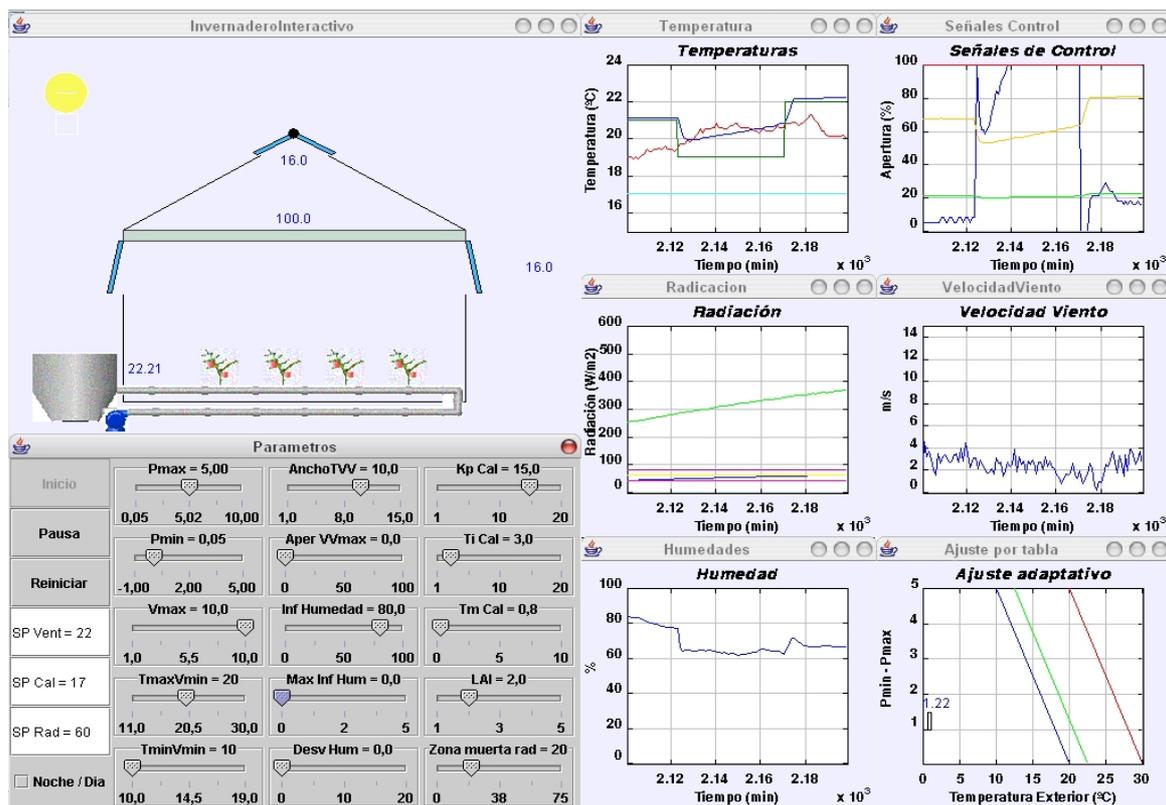


Fig. 7. Laboratorio virtual para control climático de invernaderos

3.2. Implementación del modelo

El modelo diseñado se ha implementado utilizando la herramienta de simulación *Simulink*. La inicialización del modelo se realiza ejecutando un programa implementado en *Matlab* que facilita la utilización del modelo para nuevas estructuras de invernadero, modificación de los sistemas de actuación o para otras estructuras distintas, ya que simplemente hay que modificar las variables correspondientes para que se actualicen automáticamente los bloques del modelo. Por otra parte, la simulación del modelo completo necesita resolver cinco ecuaciones diferenciales que describen sistemas con distintos comportamientos temporales, de forma que se combinan elementos con dinámicas rápidas con elementos con dinámicas lentas. *Simulink* proporciona varios algoritmos de integración numérica, seleccionándose el método de *Gear* que es el que ha resultado más eficiente con sistemas *stiff*.

Cada uno de los modelos descritos en el apartado anterior se ha implementado como un bloque con un conjunto de variables de entrada y salida que comparten e interaccionan entre sí. Cada uno de los bloques de cada nivel jerárquico se ha agrupado en un nuevo bloque correspondiente al siguiente nivel, de forma que se obtienen cinco niveles:

1. Nivel de clima del invernadero compuesto por un solo bloque, donde se indican las entradas del modelo (perturbaciones y control) y salidas correspondientes a las variables a simular.

2. Nivel de tipo de variable a modelar, compuesto por tres bloques: radiación, temperatura y humedad.
3. Nivel de variable climática a modelar, compuesto por cuatro bloques en el nivel anterior de temperatura: cubierta, aire, superficie del suelo y primera capa de suelo.
4. Nivel de proceso físico o químico, compuesto por un número determinado de bloques según cada variable a modelar (convección, conducción, radiación y calor latente).
5. Nivel de implementación de cada proceso físico.

La obtención de los parámetros correspondientes se ha realizado de forma que se optimice un criterio de mínimos cuadrados ponderados, buscando los límites de los intervalos en los que se encuentra cada parámetro mediante el método de *búsqueda secuencial* y refinando estos valores con métodos basados en *algoritmos genéticos*.

4 DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO VIRTUAL

Como se comentó anteriormente la herramienta presentada en este artículo tiene como objetivo facilitar el estudio y la comprensión del modelado y control climático de invernaderos. Dicha herramienta ha consistido en dotar de una interfaz gráfica el modelo y los algoritmos de control presentados en las secciones anteriores, siendo posible de esta forma observar en tiempo real la evolución de las distintas variables del sistema así como la acción de los actuadores a través de un sinóptico del invernadero. Para el desarrollo de la misma ha sido seleccionado el entorno *EJS*

(Esquembre, 2002) por varios motivos: facilidad de uso, portabilidad del lenguaje de desarrollo (*java*), sencilla conexión con *Matlab/Simulink*, múltiples laboratorios creados satisfactoriamente (Dormido and Esquembre, 2001; Martín *et al.*, 2004; Sánchez *et al.*, 2002; etc...). Los requisitos necesarios para hacer uso de la herramienta son disponer de un Pentium II 266 MHz con 64 Mb o superior, y tener instalado la máquina virtual de Java¹ junto con la versión de Matlab/Simulink 5.3 o superior².

La herramienta completa se puede observar en la figura 7, donde la visualización del laboratorio virtual se ha estructurado en tres zonas o secciones separadas: un sinóptico del invernadero, un conjunto de gráficas para visualizar la evolución de las distintas variables y una serie de botones y sliders para poder modificar los parámetros de control.

En la parte superior izquierda de la figura 7 se muestra el *sinóptico del invernadero*. En esta zona de la herramienta se visualiza de forma gráfica el resultado de aplicar las señales de control a los principales actuadores del sistema: ventilación, malla de sombreado y calefacción con caldera, así como el efecto del crecimiento de las plantas. Se han representado gráficamente y en color celeste las ventilaciones laterales y cenitales del invernadero, las cuales van modificando su inclinación en función del valor de controlador asociado. El valor actual en tanto por ciento de apertura se muestra en la parte inferior de las ventilaciones cenitales y junto a la ventana lateral derecha. Un ejemplo del cierre y apertura de las mismas se puede observar en la figura 8. La malla de sombreado se encuentra situada entre el habitáculo rectangular inferior del invernadero y el techo del mismo. Ha sido representada en color grisáceo y va extendiéndose y recogiendo según la salida de control correspondiente. Su valor en tanto por ciento de apertura (0% ó 100% en la versión actual, ya que el controlador utilizado es un todo/nada) se muestra en la parte superior de ésta, como se puede observar en la figura 8 donde se muestra un ejemplo su funcionamiento.

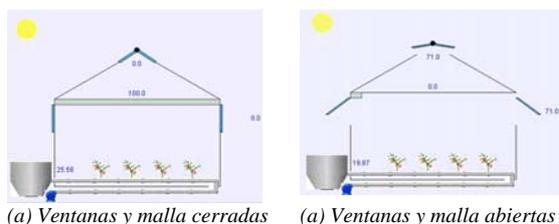


Fig. 8. Funcionamiento de ventanas y malla

El tercer sistema de actuación es el referente a la calefacción. Éste ha sido representado por una caldera, una bomba y un conjunto de tuberías.

Cuando el sistema se encuentra apagado la bomba de calefacción aparece en color azul y las tuberías en color grisáceo. En el momento que entra en funcionamiento la bomba cambia a color verde, al igual que las tuberías que van cambiando de color en función de la temperatura de las mismas. El valor actual de la temperatura de las tuberías es visualizado junto a uno de los laterales de la caldera. Un ejemplo de funcionamiento del sistema de calefacción es mostrado en la figura 9. El crecimiento de las plantas, como se comentó anteriormente, se ha considerado como una perturbación al sistema que será modificada desde un parámetro disponible en la interfaz gráfica (LAI). Sobre el sinóptico del invernadero se muestran un conjunto de plantas cuyo tamaño se modifica en función del valor de tal perturbación.

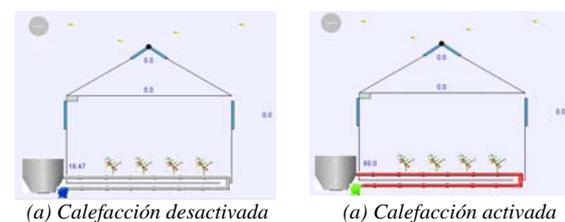


Fig. 9. Funcionamiento del sistema de calefacción

Otro elemento que ha sido incluido, aunque de menor importancia que los anteriores, ha sido la representación de la radiación solar durante el día y un pequeño efecto nocturno durante la noche. De esta forma en el periodo diurno se muestra en la parte superior izquierda del sinóptico un pequeño círculo que simula el sol y cuya intensidad va variando en función de la radiación solar obtenida desde el modelo. Cuando llega la noche el círculo cambia de color amarillento a grisáceo y aparecen unas pequeñas estrellas en el cielo. Este efecto se puede observar en las figuras 8 (día) y 9 (noche).

Respecto a las otras zonas restantes de la herramienta, en la parte derecha de la figura 7 se pueden observar el conjunto de *gráficas para visualización de variables*. Concretamente y comenzando de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, las gráficas contienen la siguiente información. La primera de ellas engloba todo lo referente a la evolución de temperaturas. En dicha gráfica se muestran en color azul la temperatura interior del invernadero, en color rojo la temperatura exterior, y en verde y celeste las consignas de temperatura diurna y nocturna respectivamente. La siguiente gráfica muestra la información relevante a las señales de control, de forma que en color azul se muestra la apertura de las ventilaciones, en color rojo la apertura de la malla de sombreado, en verde la temperatura de los tubos de calefacción y en naranja el valor de la señal de control integral asociada al controlador de calefacción (con el fin de observar el efecto del esquema antiwindup). Continuando con el orden establecido, la gráfica que se encuentra a

¹ <http://java.sun.com>

² <http://www.mathworks.es>

continuación muestra la información asociada a la radiación. En color verde se muestra la radiación PAR exterior, en azul la radiación PAR interior, en amarillo la consigna de radiación y en rosa la zona muerta establecida sobre dicha consigna, usadas ambas en el control con malla de sombreo. A continuación, las dos gráficas siguientes muestran ambas en color azul la velocidad del viento y la humedad relativa en el interior del invernadero, permitiendo de esta forma observar el efecto de estas variables sobre el control de temperatura. Por último, la gráfica restante muestra la información referente al control de ajuste por tabla para el control de temperatura con ventilación (figura 3). En dicha gráfica se puede observar como va cambiando el valor del control proporcional en función de la velocidad del viento y de la temperatura exterior. En la sección de ejemplos se explicarán situaciones más concretas sobre la importancia y la interpretación de la información aportada en estas gráficas.

Por último la última zona a tratar es la referente al grupo de *parámetros de control*. Esta zona se encuentra en la parte inferior del sinóptico del invernadero como se puede observar en la figura 3. En la primera columna de parámetros se muestran tres botones, tres campos editables y un checkbox. Los botones permiten iniciar, pausar y reiniciar la simulación. Sobre los campos editables es posible modificar las consignas para los controles de temperatura con ventilación, temperatura con calefacción y radiación respectivamente. El checkbox es utilizado para indicar si se desea comenzar la simulación durante el periodo diurno o nocturno. Una vez seleccionado bastará con pulsar el botón reiniciar y se retomará la simulación en el periodo deseado. Las dos siguientes columnas de parámetros permiten modificar los elementos asociados al control de temperatura con ventilación y que fueron comentados en la sección anterior. Estos parámetros son los valores máximo (P_{max}) y mínimo (P_{min}) para el cálculo del controlador proporcional ($K_p = 1/P$), y los cuatros siguientes son los asociados a la influencia de la velocidad del viento y la temperatura exterior en el cálculo de dicha constante proporcional (V_{max} , $T_{maxV_{min}}$, $T_{minV_{min}}$, $AnchoTVV$). Estos parámetros son utilizados para establecer los rangos de variación de la constante proporcional que se mostraron en la segunda sección y que se observan en la última de las gráficas comentadas anteriormente. Los parámetros restantes relacionados con ventilación son la apertura máxima permitida ($A_{perVV_{Max}}$) para las ventanas en caso de que la velocidad de viento supere la velocidad máxima establecida por el parámetro descrito anteriormente V_{max} , y los parámetros asociados a la optimización de consignas en función de la humedad ($InfHumedad$, $MaxInfHumedad$, $DesvHumedad$) que serán descritos en detalle posteriormente mediante un ejemplo. Los tres primeros parámetros

de la última columna permiten modificar los valores del controlador PI con antiwindup para el control de temperatura con calefacción (K_pCal , $TiCal$, $TmCal$). En esta primera versión de la herramienta el control de calefacción se ha desarrollado haciendo uso del sistema de control con antiwindup, suponiendo por tanto que la consigna de temperatura calculada por éste es alcanzada en las tuberías. Los otros dos parámetros modifican el efecto del crecimiento de las plantas (LAI) y el valor de la zona muerta para el controlador todo/nada de la radiación con malla de sombreo (Zona muerta Rad).

5 EJEMPLOS

En esta sección se presentan una serie de ejemplos que muestran como utilizar los distintos controladores de la herramienta y algunas situaciones típicas de control de invernaderos.

5.1 Control de temperatura con ventilación por ajuste por tabla

Como se comentó en secciones anteriores este tipo de control consiste en un controlador proporcional con ajuste por tabla, cuyo valor va cambiando en función de la velocidad del viento y la temperatura exterior. Para poner en funcionamiento este tipo de control, en primer lugar es necesario establecer los valores adecuados para sus múltiples parámetros. Para ello se comienza estableciendo los márgenes de variación permitidos para la constante proporcional haciendo uso de los sliders P_{max} y P_{min} , donde en este ejemplo han tomado los valores 5 y 1 °C/% respectivamente. Posteriormente se establecen los márgenes de variación de la temperatura exterior en función de la velocidad del viento. De esta forma se comienza por determinar las temperaturas máximas y mínimas para la velocidad de viento mínima (0 m/s) haciendo uso de los sliders $T_{maxV_{min}}$ y $T_{minV_{min}}$. En este caso se han establecido a 20 y 10 °C respectivamente. A continuación se realiza la misma operación para la velocidad de viento máxima (V_{max}), donde las temperaturas máxima y mínima son calculadas como la suma de las temperaturas establecidas para la velocidad de viento mínima más el valor asignado a la variable $AnchoTVV$. Para este ejemplo esta variable ha sido establecida a un valor de 10 °C, obteniéndose de esta forma 30° y 20 °C para las temperaturas máxima y mínima con velocidad de viento máxima. Con estos valores se obtienen como resultado las rectas de color rojo y azul mostradas en la gráfica de *Ajuste adaptativo*, que determinan los límites de variación según la velocidad de viento y la temperatura exterior. Cuando el sistema entra en funcionamiento el efecto de la velocidad del viento se observa con el movimiento de una tercera recta de color verde claro que se va desplazando entre las dos rectas anteriores. El valor de la constante

proporcional viene determinado por la imagen de un punto perteneciente a esta nueva recta. Para calcular dicha imagen es necesario conocer el valor en x de dicho punto, que cómo se puede observar en la gráfica viene determinado por la temperatura exterior existente en cada instante de tiempo. Un ejemplo se observa en la figura 10 donde se ha establecido una consigna de temperatura de 21 °C.

En esta figura se observa un aumento de la temperatura exterior y cómo debido a esto la temperatura interior asciende igualmente. Por este motivo y observando una velocidad de viento relativamente constante el controlador de ajuste por tabla disminuye el valor de la constante proporcional para provocar un mayor aumento ($K_p = 1/P$) en la apertura de las ventilaciones y evitar así que siga aumentando la temperatura interior.

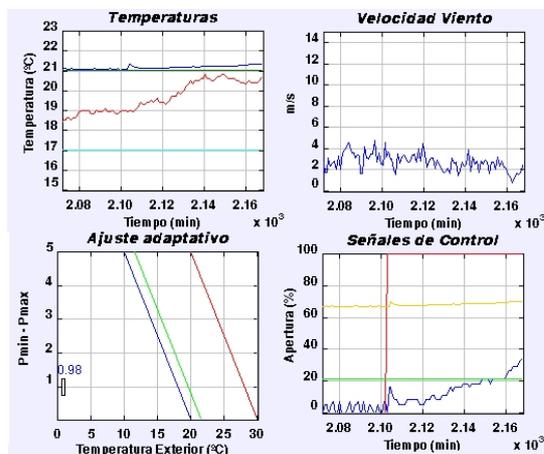


Fig. 10. Efecto de control de ajuste por tabla

5.2 Modificación de consignas en función de la humedad

La influencia de la humedad en el control de temperatura con ventilación fue tratada en la sección de algoritmos de control y como se pudo observar esta influencia recae en una modificación de la consigna de temperatura de manera que cuando la humedad aumenta desciende la consigna y viceversa, siendo esto debido a la correlación inversa existente entre ambas variables. Para observar este efecto, tras realizar los pasos comentados en el ejemplo anterior, es necesario establecer el valor de referencia de la humedad a partir del cual se determinará la influencia sobre la consigna de temperatura ($Inf \text{ Humedad}$) y el rango dentro del cual se ira produciendo dicho cambio ($Desv \text{ Hum}$). Para este ejemplo se ha establecido un valor de influencia de humedad de 80% y un rango de 20%. De la misma forma se debe establecer la variación máxima de la consigna de temperatura en °C en función de la humedad ($Max \text{ Inf Hum}$). En este caso se ha asignado un valor de 1 °C. La figura 11 muestra el resultado de aplicar estos parámetros, donde se observa cómo la consigna esta siendo optimizada a medida que varía

la humedad, y cómo la temperatura interior del invernadero responde frente a dichos cambios.

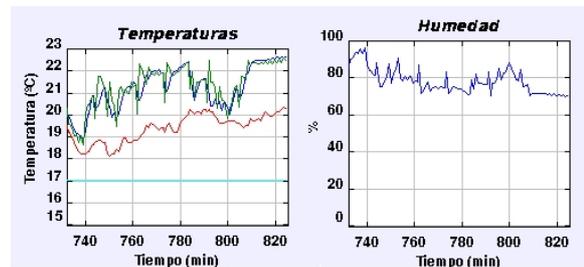


Fig. 11. Optimización de consignas en función de humedad.

5.3 Control de temperatura con Calefacción

En este apartado se muestra un ejemplo de control de temperatura nocturna con calefacción. Este control es llevado a cabo con un controlador PI más un esquema antiwindup. Por tanto, es necesario sintonizar los tres parámetros de control correspondientes (K_{pCal} , T_{iCal} , T_{mCal}), donde para el ejemplo es cuestión se han tomado los valores de 15 °C/°C, 3 min y 0.75 min respectivamente. La figura 12 muestra el efecto de aplicar dicho esquema de control para un cambio de consigna de 16 a 18 °C. Como se puede observar se vuelve a modificar la consigna en otras dos ocasiones, un nuevo cambio a 16 °C a los 312 minutos y otra a 18 °C a los 340 minutos. En la primera de ellas los parámetros del controlador permanen inalterados, sin embargo, en la segunda se cambio el valor del parámetro T_m a 3.5, observándose como la respuesta del controlador y el efecto integral del mismo reaccionan más rápidamente.

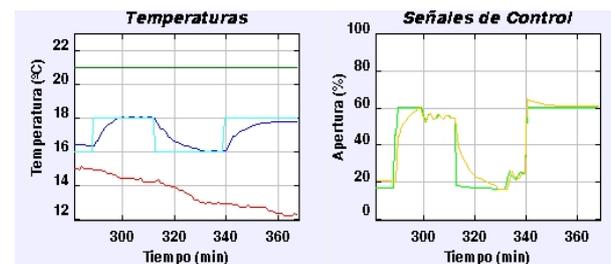


Fig. 12. Control de temperatura con calefacción

5.4 Control de radiación con malla de sombreado

Como último ejemplo se muestra el control de la radiación solar haciendo uso de la malla de sombreado. El controlador utilizado en este caso es un controlador todo/nada con zona muerta como se comentó en secciones anteriores. Por tanto, para este controlador bastará con determinar la consigna de radiación y el valor de la zona muerta deseada ($Zona \text{ muerta rad}$). Para este ejemplo se ha establecido como punto de partida una consigna de 60 W/m² y una zona muerta de 7.5 W/m². El resultado de aplicar esta zona muerta se muestra en

la figura 13. Como se puede observar para este valor de zona muerta y para la consigna establecida la malla permanece cerrada. En el minuto 895 la zona muerta es reducida a 5 W/m^2 , permaneciendo igualmente cerrada la malla durante un cierto rango de tiempo. A partir del minuto 945 aproximadamente, la radiación sale en múltiples ocasiones de la zona muerta establecida y se producen sucesivas aperturas y cierres de la malla de sombreo.

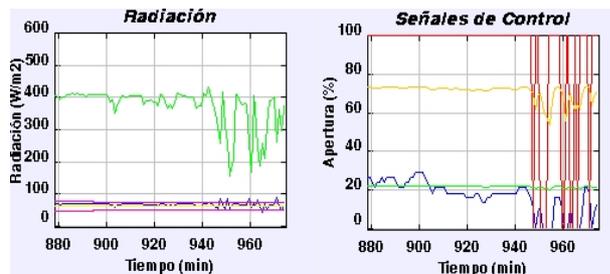


Fig. 13. Control de radiación con malla de sombreo.

5.5 Situaciones extremas

Sobre la herramienta es posible estudiar las acciones que se llevarían a cabo en presencia de ciertas situaciones extremas. Concretamente se tiene la posibilidad de limitar la apertura de las ventilaciones ($A_{perVVM_{max}}$) en el caso de que la velocidad del viento supere el valor establecido por V_{max} . En la figura 14 se muestra un ejemplo donde apertura de ventilación ha sido limitada a 10 % cuando la velocidad del viento supera los 4 m/s. Como se puede observar a los 900 minutos se observa como la limitación establecida entra en funcionamiento.

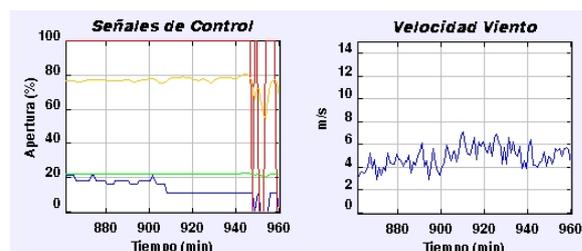


Fig. 14. Saturación en caso de sobrepasar VV_{max}

6 EXPERIENCIA CON LA HERRAMIENTA

Esta primera versión de la herramienta está disponible desde septiembre de 2004, por lo que durante el curso académico 2004/2005 los alumnos han podido hacer uso de ella. Concretamente la experiencia se ha realizado en la asignatura de *Control y Robótica en Agricultura* que se imparte en las titulaciones de Agronomía de la Universidad de Almería. En la encuesta que realizan los alumnos al final de la asignatura se han incluido cuestiones acerca de la influencia de las nuevas tecnologías en la docencia.

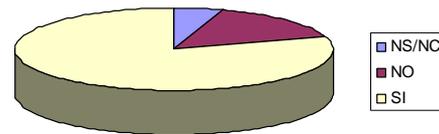


Fig. 15. Respuesta a pregunta: ¿Le ha sido de utilidad esta herramienta como complemento a su formación?

Como se puede observar en las figuras 15 (respuestas afirmativas más de un 80 %) y 16 (respuestas afirmativas más de un 90 %), la opinión de los alumnos ha sido favorable sobre la utilización de este tipo de herramientas ya que les facilita el estudio y comprensión de los contenidos teóricos de la asignatura. Hasta ahora estos conceptos se habían explicado en clases magistrales (pizarra y transparencia), realizándose prácticas donde se aplicaban los mismos bajo los entornos *Matlab/Simulink*. En este curso académico estas tareas se han realizado apoyándose en la herramienta con simulaciones interactivas, facilitando tanto la labor docente del profesorado como el trabajo personal del alumnado. Aunque el uso de esta herramienta ha servido como complemento al estudio de los algoritmos de control climático del interior de invernaderos, se ha continuado con el desarrollo de prácticas habitual de la asignatura en el que los alumnos los diseñan, implementan y prueban en plantas de laboratorio (Guzmán *et al.*, 2005b) completando su formación en estos conceptos.

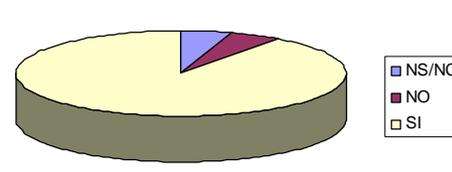


Fig. 16. Respuesta a pregunta: ¿Han hecho uso de la herramienta como apoyo a su trabajo personal?

7 CONCLUSIONES

Hasta hace relativamente poco tiempo los modelos y controladores desarrollados en el ámbito de investigación no solían encontrarse a disposición de los estudiantes debido a que no existían herramientas que permitiesen abstraer de una forma sencilla y transparente la teoría matemática subyacente en los mismos, algo frente a lo que los alumnos eran reacios. Gracias a la aparición de nuevas herramientas de desarrollo, como es el caso de EJS, es posible llevar a cabo esta abstracción y poder así poner a disposición de los estudiantes los resultados de investigación desarrollados. Tomando como base los resultados obtenidos en el campo de la educación en automática, este trabajo presenta un laboratorio virtual para la enseñanza del control

climático de invernaderos desarrollado con EJS y haciendo uso del modelo y los controladores desarrollados en Rodríguez (2002). Como futuros trabajos se proponen los siguientes:

- Tener en cuenta situaciones extremas en el control de temperatura con ventilación: presencia de lluvia, dirección de viento, etc...
- Incorporación de nuevos actuadores y poder modificar los parámetros de los ya existentes.
- Utilización de nuevos algoritmos de control, tales como predictivo con restricciones.
- Disposición de control manual con el fin de poder estudiar el efecto de los distintos actuadores sobre el sistema.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la CICYT bajo el marco de los proyectos DPI2001-1012, DPI2001-2380-C02-02 y DPI-2002-04375-C03-03, y la convocatoria de proyectos CR-UAL (2002) en el marco del proyecto 0206.

REFERENCIAS

- Dormido, S. (2004). Control Learning: Present and Future. *Annual Reviews in Control*, Wiley, **28**(1), pp. 115-136.
- Dormido, S.; Esquembre, F. (2003) The quadruple-tank process: An interactive tool for control education, *Proc. ECC'03*, Cambridge, 6 pp.
- Esquembre, F. (2002). *Easy Java Simulations 3.1.*, <http://fem.um.es/Ejs/>.
- Guzmán, J.L.; Berenguel, M.; Dormido, S. (2005a). Interactive teaching of constrained generalized predictive control. *IEEE Control Systems Magazine*. Aceptado y en prensa.
- Guzmán, J.L.; Berenguel, M.; Rodríguez, F.; Dormido, S. (2005b) Web-based Remote Control Laboratory using a Greenhouse Scale Model. *Computer Applications in Engineering Education*, Wiley. Aceptado y en prensa.
- Martin, C.; Urquia, A.; Sanchez, J.; Dormido, S.; Esquembre, F.; Guzmán, J.L.; Berenguel, M. (2004) Interactive Simulation of Object-Oriented Hybrid Models, by Combined Use of Ejs, Matlab/Simulink and Modelica/Dymola. *18th European Simulation Multiconference*, pp. 210-215. Magdeburg, Germany.
- Rodríguez, F.; Berenguel, M.; Guzmán, J.L.; Dormido, S. (2005) A virtual course on automation of agricultural systems, *The International Journal of Engineering Education: Special issue on agricultural/biosystem/biological engineering education*. (Aceptado).
- Rodríguez, F. (2002). *Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero*. Ph.D. Thesis. University of Almería, Spain, 366 pp.
- Rodríguez, F.; Berenguel, M. (2001a). Sistemas de control climático de invernaderos (II). Sus efectos en el crecimiento del cultivo. *Riegos y Drenajes*, Elsevier, nº 116, pp. 28-37.
- Rodríguez, F.; Berenguel, M. (2001b). *Obtención de modelos simplificados para el control climático de invernaderos*. I Congreso Nacional de Agroingeniería; Valencia; España; pp. 429-435.
- Rodríguez, F.; Arahal M.; Berenguel, M. (1999) *Application of artificial neural networks for greenhouse climate modelling*. ECC99, Karlsruhe, Germany.
- Sánchez, J.; Morilla, F.; Dormido, S.; Aranda, J.; Ruipérez, P.: (2002). Virtual Control Lab Using Java and Matlab: A Qualitative Approach, *IEEE Control Systems Magazine*, **22**(2), pp 8-20.