

Modelación Física de un Invernadero para el Desarrollo de un Sistema de Control Climático

Rodrigo Castañeda, Gilberto Herrera Ruiz y Juan José García Escalante

Facultad de Ingeniería, DEPFI, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, México.
C. P. 76010, Tél. 01 442 2154340 Ext. 117. E-mail: rcast@sunserver.dsi.uaq.mx

Resumen

El modelo físico del clima de un invernadero es una herramienta de suma importancia para el desarrollo de un sistema de control climático en invernaderos. Este trabajo presenta el análisis y simulación del modelo climático de un invernadero propuesto por A. Slim (1993). El modelo está formulado con base en los procesos de transferencia de energía, tales como: conducción, convección, radiación y vaporización. El análisis de este modelo nos permite explicar las complejas interacciones entre las variables climáticas internas, y cómo éstas son influidas por el clima exterior; de tal forma que la información obtenida pueda ser introducida al sistema de control. Así mismo, se presentan los elementos de instrumentación y control necesarios para la calibración y validación del modelo.

Palabras Clave: Agrometeorología, automatización, balance de energía.

Abstract

The physical model of a greenhouse is a very important tool for the development of a climate control system. This work presents the analysis and simulation of a model proposed by A. Slim (1993) for a greenhouse. The climate model is formulated with the help of energy balance processes such as conduction, convection, radiation, and vaporization. The analysis of this model allows us to explain the complex interactions of internal climatic variables and how they are influenced by the outside weather. Also, the elements of instrumentation and control necessary for calibration and validation of these models are presented.

Key Words: Agrometeorology, automation, energy balance.

Introducción

El presente estudio tiene como objetivo crear tecnología que permita una alta productividad, basada en el desarrollo de la instrumentación y control automático de un invernadero experimental en la Universidad Autónoma de Querétaro. Esto, como consecuencia de que la tecnología de invernaderos disponible en México fue desarrollada para áreas donde el clima es diferente al nuestro; por ejemplo, los invernaderos holandeses están diseñados para permitir al máximo la penetración de luz y evitar la pérdida de calor al interior del invernadero. En nuestro país los requerimientos están más dirigidos a evitar, en ocasiones, el exceso de luz y en mantener temperaturas más bajas dentro del invernadero que en el exterior. Es razonable que estas diferencias nos lleven a un diseño totalmente distinto de invernadero. Lo anterior nos plantea la necesidad de contar con formas para predecir el comportamiento del

invernadero bajo condiciones específicas exteriores y analizar su operación mediante procesos como pantallas térmicas, ventilación nocturna u otras; por lo que el modelado del clima en invernaderos es de gran importancia.

El ambiente en un invernadero está representado por un grupo de factores climáticos, tales como radiación, temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂, los cuales afectan el desarrollo y crecimiento de la planta. Para poder tener un buen control del clima del invernadero es necesario tener un amplio conocimiento de las variables que influyen en él, con ello será posible predecir ciertos cambios al interior del invernadero debido a cambios del exterior (radiación, viento, temperatura), y con ello tomar medidas preventivas para tener las mejores condiciones para el cultivo y optimizar gastos de insumos como gas para calentar el invernadero, cuyo consumo significa en muchos

casos hasta un 30% de los gastos de operación del mismo.

El desarrollo de modelos de clima de un invernadero no sólo puede usarse para conocer el comportamiento térmico del sistema; sino también para el análisis y diseño de nuevos algoritmos y métodos de control. Hay gran necesidad de modelos de clima de invernaderos, especialmente en países donde este tipo de tecnología de producción es relativamente nueva, como México.

La principal razón del lento desarrollo de los modelos de control es la relativa complejidad del clima en un invernadero.

Se tienen dos diferentes métodos para obtener un modelo. El primero es basándose en el análisis de los datos de entrada y salida del proceso, el otro es con base en las leyes físicas involucradas en el proceso. El primer método está basado en la experimentación, donde las señales de entrada y salida del sistema a identificar son grabadas y sujetas a un análisis de datos en orden para inferir un modelo. En el segundo método, se emplean las propiedades termodinámicas del invernadero como sistema, dado que puede ser considerado como un colector solar y su desempeño puede ser descrito por medio de las ecuaciones de balance de energía y masa. Si se sigue esta última metodología para obtener un modelo, el clima en un invernadero puede ser cuantificado en relación a las condiciones climáticas externas y las propiedades físicas del invernadero y su equipamiento.

Los intercambios energéticos entre el interior del invernadero y el clima exterior son complejos, ya que están relacionados entre sí, y a su vez, hacen intervenir todos los modos de transferencia de calor: por radiación térmica, conducción y convección (Matallana, 1995). Conjugar estos intercambios energéticos mediante una expresión matemática es complejo a causa de los numerosos factores que intervienen. Para el cálculo de las expresiones matemáticas que definen los intercambios energéticos entre el invernadero y el clima exteriores se pueden seguir metodologías como las descritas por algunos investigadores (Udink, 1989), modelos sofisticados que tienen en cuenta a detalle la descripción del balance de energía para cada componente del invernadero (Bot, 1983), modelos simplificados basados en la linealización de los intercambios de calor sensible y latente (Boluard, 1993).

El análisis y estudio de estos modelos nos puede permitir simular y establecer los niveles adecuados de cada variable durante los diferentes estados de desarrollo de la planta. Este modelo se transfiere al sistema de control del invernadero, el cual puede permitir una administración del crecimiento del cultivo. Entonces, la obtención de un modelo confiable puede ser de utilidad para el diseño y desarrollo de herramientas de ingeniería para los invernaderos en nuestro país.

Bases del modelo climático

Aunque para cada parte independiente del invernadero y su contenido, un balance puede ser formulado, sólo consideramos los balances de energía en la cubierta, aire, cultivo y suelo del invernadero. En cada elemento, la cantidad de energía ganada menos la pérdida es igual a la energía acumulada. También habría que añadir la conservación de masa, en este caso a través de la conservación del vapor de agua. Las plantas aportan vapor mediante la transpiración y el suelo también constituye una fuente de aporte de vapor de agua, en la mayoría de los casos muy inferior a la primera. A veces hay equipos de refrigeración por evaporación que aportan humedad al ambiente. Las pérdidas de vapor provienen de la ventilación y de la condensación sobre superficies frías. La suma de aportes y pérdidas durante un periodo de tiempo es igual a la cantidad de vapor de agua acumulada durante ese tiempo en el aire del invernadero.

Si se conocen las condiciones exteriores al invernadero (temperatura del aire exterior, velocidad del viento, temperatura del firmamento, etc.) y los parámetros del invernadero (propiedades ópticas y térmicas de la cubierta, volumen de aire, superficie, etc.), los balances de energía permiten calcular las temperaturas del aire, plantas, cubierta, etc. Para ello es preciso conocer las expresiones de cálculo de cada uno de los términos del balance y resolver simultáneamente las ecuaciones. Este conjunto de expresiones matemáticas que describen el comportamiento del invernadero constituirán nuestro modelo climático.

Balance de energía en la cubierta

La tasa de transferencia de calor hacia, y desde el techo determina la eficiencia de la cubierta como barrera entre el aire interior y exterior. La mayoría de las cubiertas de los invernaderos están construidas con materiales plásticos (polietileno); en general, son bastante delgadas, por lo que la diferencia entre

la temperatura interior y exterior puede ser despreciada y considerar que la cubierta tiene una temperatura homogénea T_r .

El balance de transferencia de calor hacia y desde la cubierta está representado en el esquema de la Figura 1.

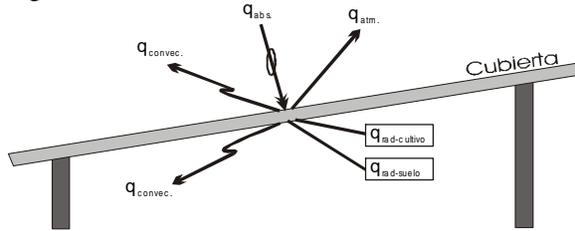


Figura 1. Esquema del balance de energía en la cubierta.

La diferencia entre los flujos de calor entrantes y salientes tiene que ser igual al calor almacenado (en el techo). Cuando todos estos flujos son divididos por el área de tierra, se puede escribir la ecuación para el balance de la densidad de flujo de calor en la cubierta de la siguiente forma:

$$q_{cubierta}^{radiación} + q_{cubierta}^{absorción} - q_{cubierta-cielo}^{radiación} - q_{cubierta}^{convección} = \delta_r \cdot A_r \cdot \rho_r \cdot c_r \cdot \frac{dT_r}{dt}$$

Balance de energía en el aire interno

El balance de transferencia de calor en un invernadero ocurre por el proceso de convección, vía ventilación natural. La diferencia de flujos de calor es igual a la capacidad calorífica del aire dentro del invernadero.

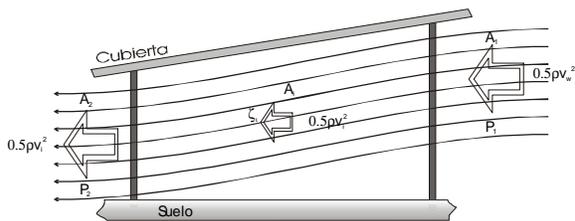


Figura 2. Esquema del balance de energía en el aire interno.

Este balance puede ser expresado mediante la siguiente ecuación:

$$q_{interna}^{convección} - q_{vent.} = V_i \rho_i c_p \frac{dT_i}{dt}$$

Balance de energía en el cultivo

El cultivo absorbe la energía transmitida por la cubierta. El porcentaje de calor transferido absorbido depende del coeficiente de transmisión de la cubierta y el coeficiente de emisión de las hojas. Con las superficies de los alrededores (suelo y cubierta), existe una transferencia de calor vía radiación. Todos estos flujos de calor se deben al gradiente de temperatura. Para que el cultivo pueda mantener una temperatura constante las hojas evaporan agua. La cantidad de calor transferido por evaporación de las hojas depende de la concentración de vapor de agua. Las densidades de flujo de calor entrantes y salientes en las hojas son igual a su capacidad de almacenar calor. Todos estos flujos en el cultivo son representados en la Figura 3.

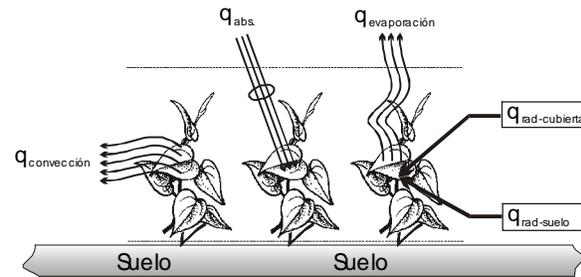


Figura 3. Esquema del balance de energía en el cultivo.

Este balance es expresados en la siguiente ecuación:

$$q_{abs} + q_{cultivo}^{radiación} - q_{cultivo}^{convección} - q_{cultivo}^{evaporación} = LAI \cdot \delta_c \cdot \rho_c \cdot c_c \cdot \frac{dT_c}{dt}$$

Balance de energía en la superficie del suelo

La temperatura del suelo depende de la cantidad de calor recibida y de la forma en la que el calor se disipa.

En la superficie de la tierra cubierta por el invernadero, ocurren varios flujos de energía:

- La radiación de onda corta que penetra la cobertura y es absorbida por el suelo.
- El calor radiante de onda larga que es intercambiado con otros componentes opacos en el invernadero.
- La transferencia de calor por convección con el aire que sopla en la superficie del suelo.
- La transferencia de calor por conducción dentro de la tierra.

Una ilustración de las transferencias de calor citadas se representa en la Figura 4:

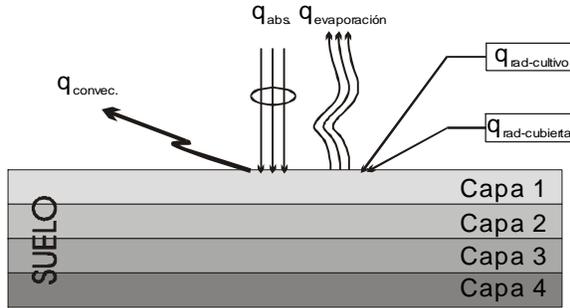


Figura 4. Esquema del balance de energía en el suelo.

Considerando todos los flujos de calor, el balance de energía en el suelo está dado por la siguiente ecuación:

$$q_{abs.} + q_{suelo}^{radiación} - q_{suelo}^{convección} - q_{suelo}^{conducción} = \delta_g \cdot A_r \cdot \rho_{gr} \cdot C_{gr} \cdot \frac{dT_g}{dt}$$

Balace de humedad

Durante el proceso de evaporación del cultivo y el suelo se produce una gran cantidad de vapor que se acumula con el tiempo; el viento transporta este vapor fuera del invernadero. El balance de vapor puede ser descrito por la siguiente ecuación:

$$\phi_{m,pro} - \phi_{m,salida} = V_t \cdot \rho_a \cdot \frac{dx_t}{dt}$$

Materiales y Métodos

Monitorización climática

El diseño para la monitorización climática dentro y fuera del invernadero se desarrolló teniendo como plataforma una PC-486 a 100 MHz, una tarjeta de adquisición de datos (CIODAS48-PGA) y el lenguaje de programación C. Los datos climáticos fueron grabados dentro de una base de datos cada cinco minutos. Se desarrolló una estación meteorológica para la monitorización climática externa que cuenta con sensores de radiación global, precipitación pluvial, velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa. La estación fue colocada a una altura de 5 m en la parte alta de una de las estructuras que soporta la malla sombra. Al interior del invernadero, se instalaron sensores de temperatura y

humedad relativa ubicados a una altura de 2.20 m en distintos puntos dentro del invernadero.

Las señales provenientes de los distintos tipos de sensores fueron sujetas a un filtrado tanto analógico (filtro pasa-bajas) como digital (filtro mediana promediador).

Sistema de control de los actuadores

La manipulación de los actuadores del equipamiento del invernadero (ventanas, malla sombra, malla térmica, calentadores nebulizadores, riego) puede realizarse de forma manual o automática por medio de una tarjeta de control desarrollada utilizando como base un FPGA (Field Programmable Gate Array). En la Figura 5, se muestra el esquema de síntesis del FPGA utilizado. El programa para realizar la síntesis y simulación del FPGA fue desarrollado en un lenguaje descriptivo de hardware para circuitos integrados de muy alta velocidad (VHDL).

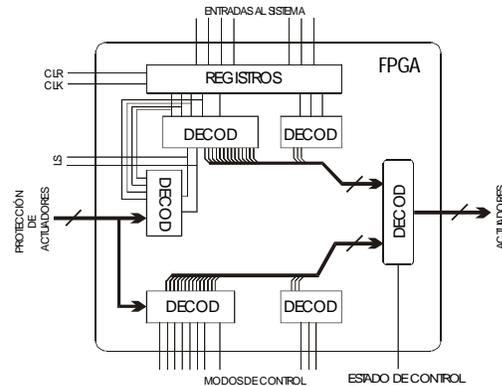


Figura 5. Esquema de síntesis del FPGA para control de los actuadores en el invernadero.

Este programa nos permite simular el funcionamiento de nuestros dispositivos antes de que se lleve a cabo la síntesis.

El sistema (Figura 6) nos permite que el invernadero pueda ser controlado de forma manual o automática. Para el caso del modo automático se desarrolló una interfase, la cual interactúa con la tarjeta del FPGA y, basándose en la lectura obtenida de los sensores, determina la acción de control a realizar sobre los actuadores del invernadero. Esta interfase fue desarrollada en el lenguaje de programación C.

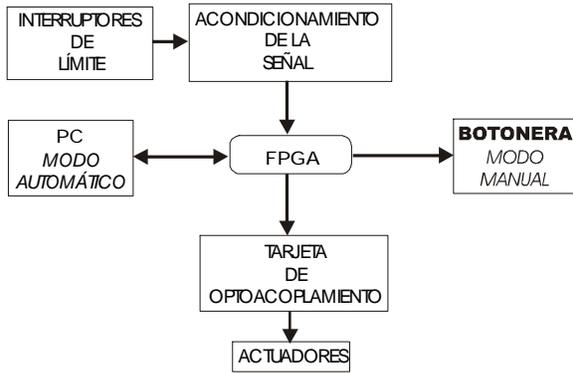


Figura 6. Diagrama esquemático del sistema de control.

Proceso de simulación del modelo

Para estimar las condiciones climáticas en el invernadero, se requiere la simulación dinámica del modelo matemático. En el presente trabajo se utilizó MATLAB para la simulación del modelo.

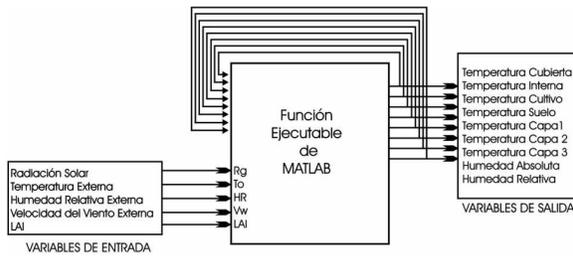


Figura 7. Diagrama de bloques del modelo.

Las variables de entrada al modelo son condiciones del clima local y tamaño de la planta. Las condiciones climáticas externas de entrada al modelo son la radiación global, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. La caja negra del diagrama de bloques simplificado de la Figura 7 representa la función ejecutable de MATLAB que describe el modelo.

La simulación calculará las variables desconocidas: temperatura de la cubierta, la interna, la del cultivo, la del suelo y las de las capas uno a la tres del suelo, humedad absoluta y humedad relativa. En la Figura 8, se muestran algunas de las variables estimadas por el modelo.

Experimentos realizados

Las simulaciones se llevaron a cabo en días característicos entre abril y julio del año 2001 en el invernadero experimental de la universidad. El invernadero está forrado de plástico y su piso se

encuentra forrado con una lona blanca, tiene 37.1 m de largo en dirección norte-sur y consiste de cuatro naves, cada una de 6.75 m de ancho. Tiene una altura de 4.5 m y 3 m hasta el nivel de las canaletas. Cuenta con ventilación lateral en las cuatro paredes del invernadero, y también ventanas cenitales de 62 m² en cada nave. Se tiene una densidad de 2 plantas/m² en macetas de plástico blanco. Está equipado con el sistema de control desarrollado en la universidad.

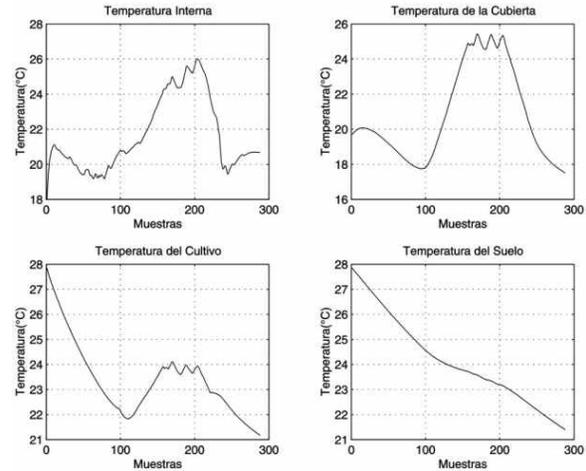


Figura 8. Gráficas de las temperaturas: interior, cubierta, cultivo y suelo.

Las variables climáticas tanto internas (temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, humedad relativa) como externas (temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, humedad relativa, radiación global, velocidad y dirección del viento, precipitación pluvial) fueron obtenidas cada cinco minutos para la simulación del modelo. Los parámetros desconocidos de las ecuaciones se obtuvieron de la literatura.

Los resultados de la simulación del modelo para la temperatura y humedad relativa fueron comparados contra los datos medidos al interior del invernadero de temperatura y humedad respectivamente, de donde se obtuvieron sus regresiones lineales y parámetros estadísticos, los cuales se tomaron como base para determinar qué tan aproximadas están las estimaciones de las mediciones.

El resultado obtenido de la simulación del modelo para un día característico del mes de abril se muestra continuación. Las gráfica de dispersión para la temperatura y humedad relativa junto con su regresión lineal aparecen en las figuras 9 y 10. Las figuras 11 y 12 muestran los resultados de la

simulación en tiempo de la temperatura y humedad relativa.

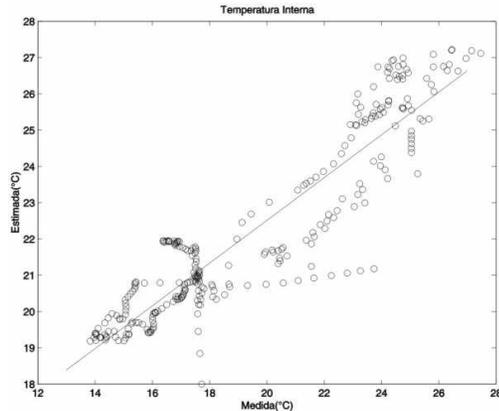


Figura 9. Temperatura medida vs calculada para 288 muestras (abril).

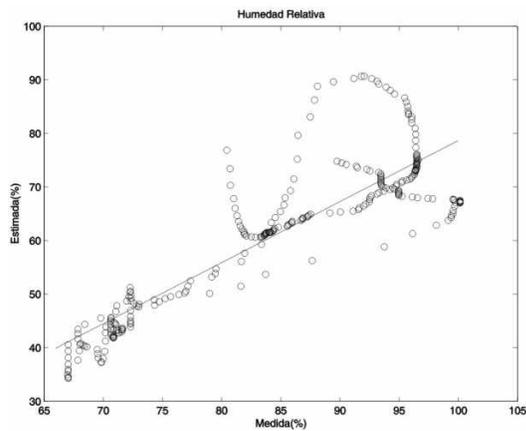


Figura 10. Humedad relativa medida vs calculada para 288 muestras (abril).

En la simulación para la temperatura se obtuvo una ecuación de regresión lineal $y = 0.6162x + 10.2129$, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.834. Para la humedad relativa, una ecuación de regresión $y = 1.13952x - 35.2893$, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.7647.

El coeficiente de determinación nos indica el nivel de ajuste del modelo. Entre más cercano sea este valor a uno, mayor es la cantidad de variación total que puede explicarse por medio de (el predictor), los términos que aparecen en el modelo de regresión.

Validación y calibración del modelo

La calibración de un modelo es el proceso de alterar parámetros para obtener una mejor aproximación entre lo simulado y lo medido. Los parámetros esco-

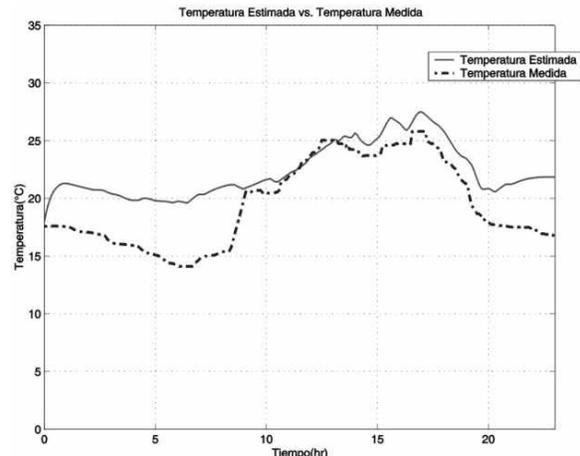


Figura 11. Gráfica de tiempo de la temperatura estimada y la medida.

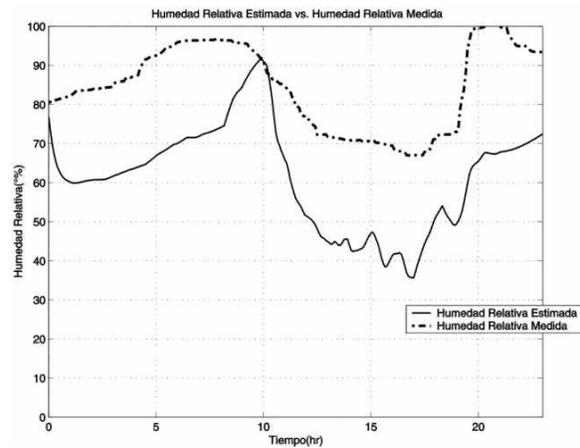


Figura 12. Gráfica de tiempo de la humedad relativa estimada y la medida.

gicos para la calibración deben preferentemente ser los inciertos, que afectan más el comportamiento del sistema (sensibles).

El modelo fue calibrado usando los datos medidos de días específicos del mes de mayo. Los parámetros fueron adaptados manualmente hasta que las simulaciones de la temperatura del aire interno y humedad relativa interna tuvieran un ajuste aceptable a los datos medidos.

Para obtener la habilidad del modelo y describir el clima, los modelos fueron simulados para la validación contra días característicos del mes de junio del mismo año.

Los parámetros que se calibraron fueron los siguientes: factor de nubosidad Ka , calor específico

de la hoja C_c , factor de fricción F_o , calor específico transferido del techo C_r , coeficiente de reflexión de la tierra ρ_g , coeficiente de absorción de la tierra ϵ_g .

Una vez calibrados los parámetros, para la validación del modelo se tomaron datos de un día característico del mes de junio.

En las figuras 13 y 14, se muestran las gráficas de dispersión. Las figuras 15 y 16 muestran el desempeño de este modelo.

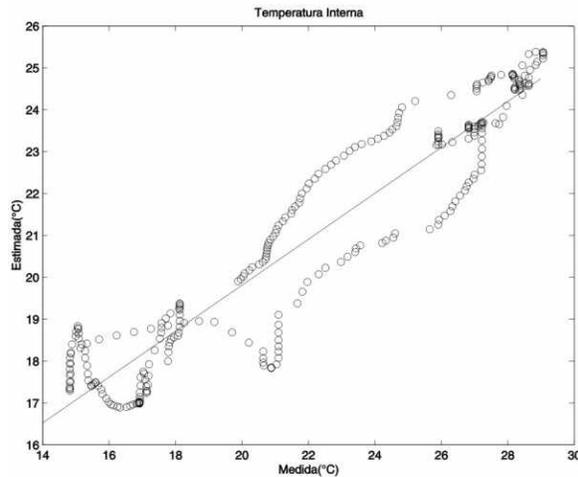


Figura 13. Temperatura medida vs. calculada para 288 muestras (junio).

En caso de la temperatura se obtuvo una ecuación de regresión lineal $y = 0.9759x - 1.1525$, con coeficiente de determinación R^2 de 0.9641. Para la humedad relativa se obtuvo una ecuación de regresión lineal $y = 0.8988x - 0.9658$, con coeficiente de determinación R^2 de 0.9603.

Resultados y Discusión

El desarrollo de las herramientas agrometeorológicas y de control de invernaderos bajo nuestras limitaciones, nos lleva a un nuevo escenario en el desarrollo tecnológico del país en esta área, el cual puede ser de gran ayuda para los productores mexicanos.

La disponibilidad de tecnología relativamente reciente en nuestro país (FPGAs y los lenguajes descriptivos de hardware) permiten dar soluciones competitivas a las exigencias de diseñar cantidad muy grande de elementos constructores en un solo chip, lo cual ha llevado a la aplicación de una

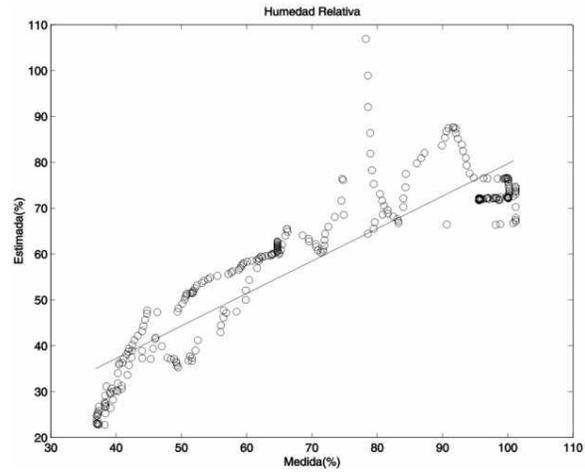


Figura 14. Humedad relativa medida vs. calculada para 288 muestras (junio).

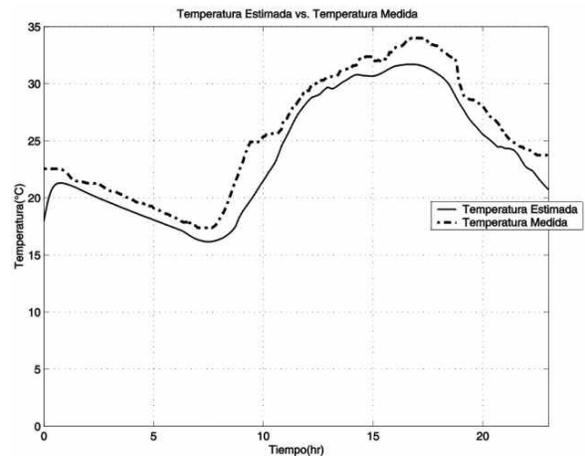


Figura 15. Gráfica de tiempo de la temperatura estimada y la medida.

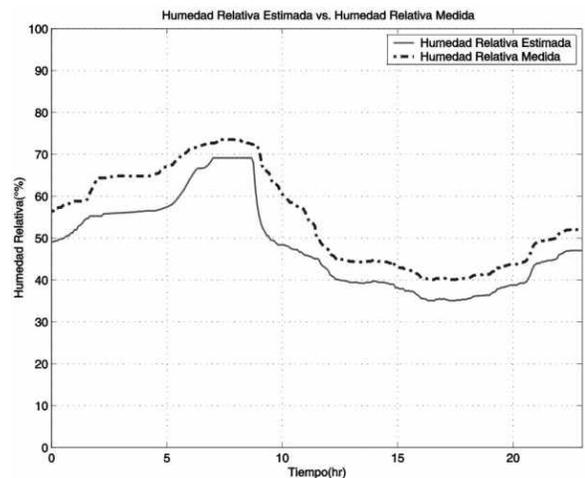


Figura 16. Gráfica de tiempo de la humedad relativa estimada y la medida.

nueva filosofía en el diseño electrónico denominado SOC (*System on-a-chip*, sistema de un solo *chip*). Esto representa pasar del diseño tradicional que consistía en unir componentes previamente diseñados al desarrollo de sistemas que incorporan la solución en un solo dispositivo.

El sistema de control actualmente está funcionando en el invernadero experimental de la Universidad Autónoma de Querétaro. Al estar basado en una PC, ofrece una arquitectura abierta, la cual nos da la posibilidad de introducir diferentes tipos de controladores, así como integrar nuevas funciones y dispositivos al sistema de control.

El modelo presenta ajuste aceptable de la temperatura y humedad relativa estimadas contra las medidas. Las pendientes de las líneas de regresión nos indican si el modelo subestima o sobreestima las variables de comparación (temperatura y humedad relativa), según si éstas son menores o mayores a uno. Después de la calibración, para ambas variables el modelo subestima los valores. Para este modelo, la gran cantidad de parámetros que se toman en cuenta es una de las principales limitantes, ya que los procesos de calibración y validación son muy complejos. Este modelo puede ser utilizado para predecir el comportamiento del invernadero en distintas épocas del año, ya que podemos observar la influencia de la variación de las condiciones climáticas externas en cada una de las partes del invernadero. Además, nos puede ayudar para el diseño de nuevas herramientas de ingeniería para invernaderos. Este modelo puede usarse para explorar diferentes métodos para el control del clima.

Conclusiones

El sistema de control desarrollado es una opción económica, confiable y competitiva para la producción bajo invernadero.

El modelo estudiado fue calibrado y validado contra datos experimentales. Esto fue posible identificando los principales parámetros, que influyen en el comportamiento de los modelos, lo cual nos llevó a entender mejor los diferentes procesos que tienen lugar dentro del invernadero. En cuanto a la calidad de la instrumentación (precisión de los sensores, control de actuadores, etc.) es de gran importancia en los resultados que se obtienen de la simulación de los modelos.

Este modelo puede emplearse en condiciones diferentes a las utilizadas para la validación, presentando una aproximación similar a la obtenida en los experimentos. El modelo estudiado proporciona una herramienta de apoyo para el análisis de las condiciones necesarias para la producción de hortalizas en invernaderos bajo condiciones climáticas de la región centro de México. De igual forma, se pueden usar para determinar el impacto del uso de mallas térmicas o mallas sombras en el invernadero, así como de otros equipamientos.

Este modelo puede introducirse al sistema de control de forma directa y su desempeño es muy bueno debido a que no se cuenta con la medición de todas las variables que se encuentran involucradas (algunas de estas variables fueron estimadas por medio de ecuaciones tomadas de la literatura). Si todas estas variables fueran medidas, se tendría una forma precisa de controlar, aunque costosa. Dado que el objetivo del proyecto global de la universidad es transferir la tecnología a los productores mexicanos, este tipo de controlador no sería accesible. Por lo que estos modelos deben utilizarse únicamente como apoyo para el diseño y equipamiento de invernaderos, así como para combinarlo con sistemas expertos para el control.

Para el desarrollo de herramientas de control climático de invernaderos, proponemos que se trabaje con modelos reducidos (Castañeda y Herrera, 2002). Debido a la simplicidad de este tipo de modelos con respecto al modelo propuesto en este trabajo, éstos pueden emplearse para la implementación de control en línea del clima en un invernadero.

Literatura Citada

Analog-Digital Conversion Handbook, 1986. Third Edition, Analog Devices.

Atkinson L. and M. Atkinson. 1990. Using C. Ed. Programming Series, QUE.

Bird, R. B., W. E. Stewart and E. N. Lightfoot. 1982. Fenómenos de Transporte, Ed. Reverté.

Boaventura, J., A. E. B. Ruano and C. Couta. Identification of Greenhouse climate dynamic Models. Computers in agriculture.

Bot, G. P. A. and N. J. Van de Braak, 1995. Greenhouse climate control an integrated approach. Wageningen Pers.

- Boulard, T. And S.Wang. 1999. Greenhouse transpiration simulation from external climate conditions. *Agricultural and forest meteorology*.
- Challa, H. 1995. Greenhouse Control an integrate approach.
- Hayes, T. C. and P. Horowitz. 1989. *The Art of Electronics*. Ed. Cambridge.
- Jarvis, B. 1999. Excess humidity can play havoc with the health of greenhouse crops.
- Matallana, E. 1996. *Invernaderos, diseño y construcción*. Ed. Mundi-Prensa.
- Mitra, S. K. 1998. *Digital Signal Processing, A Computer-Based Approach*. Ed. Mc Graw-Hill.
- Salim, A. 1993. Greenhouse for tropical regions. Technische Universiteit Delft. Faculteit der Werktuigbouwkunde.
- Sheingold, D. H. 1986. *Transducer Interfacing Handbook*, Analog Devices.
- Stoltz, K. 1994. Todo acerca de redes de computación.

Recibido: 20 de septiembre de 2002
Aceptado: 20 de septiembre de 2003