

CONTROL ÓPTIMO PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA EN EL CULTIVO DE TOMATE EN INVERNADERO BASADO EN UN SISTEMA DINÁMICO

E.J Córdoba Gutiérrez

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Lomonosov
erickjavier.cordova@alumno.buaq.mx

J.M Gutiérrez Arias

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Lomonosov
jmgutierrez@ece.buap.mx

I López Cruz

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Lomonosov

G. Mino Aguilar

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Lomonosov

E. Ochoa Pineda S. Lemak

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Lomonosov

Resumen

Un control óptimo para regular la temperatura al interior de un invernadero se puede obtener a partir del modelo matemático integrado del cultivo y del invernadero. El modelo en consideración es exclusivo de la sierra norte del estado de Puebla, México; pues los parámetros necesarios se determinaron durante un periodo de cosecha de 80 días en la época de invierno. El modelo considera cinco estados: relativo con el cultivo consideramos el número de nodos, la masa seca del dosel y la masa seca de la raíz; relativo con el invernadero consideramos, la temperatura al interior del invernadero y la humedad relativa.

Para aplicar la teoría de control óptimo, seleccionamos un costo funcional con el fin de aumentar el beneficio del agricultor, significa que el agricultor además de aumentar potencialmente la producción del cultivo obtendrá un ahorro en los gastos de consumo de energía.

Construimos el algoritmo que da solución al problema de control óptimo y realizamos la simulación en un periodo de 80 días.

Palabra(s) Clave: Control óptimo, Modelo dinámico integrado, Sistema de calefacción, Variables auxiliares, Variables de estado.

Abstract

An optimal control to regulate the temperature inside of a greenhouse can be obtained from a mathematical model, where such mathematical model integrates the dynamic model of the crop (tomato crop) and the greenhouse. This paper considers the dynamic model exclusive from northern mountain range of Puebla, Mexico. This means that all parameters were determined from a harvest throughout a period of 80 days in the winter season. The dynamic model considered 5 state variables, three of them are relative from the crop, they are the number of nodes (plant development), the biomass dry canopy, and the biomass dry root. The last 2 variables state are linked to the greenhouse, these are the temperature inside of the greenhouse and the relative humidity. Applying the optimal control theory with a proposal criterion of optimization, admissible trajectories for the variables state were obtained; such trajectories maximize the benefit of the crop, thereby the farmers and harvest improves the crop production, and reduce the energy consumption. An algorithm was built, which gives a solution for the optimal control and simulates a harvest throughout a period of 80 days.

Keywords: *Auxiliary states, Heating system, Integrated Dynamic Model, Optimal control, Variable state.*

1. Introducción

Un cultivo en crecimiento puede considerarse como un modelo dinámico, este modelo dinámico agrega el entorno donde se desarrolla, el cual describe la

temperatura y la humedad relativa, estas ecuaciones pueden recrear con buenos resultados el ambiente de crecimiento de los cultivos, esto significa que son sistemas complejos, los cuales proporciona información precisa del crecimiento a través de un periodo de cosecha. La información es suficiente para ciertas aplicaciones. El control del entorno de crecimiento es el principal punto para obtener un crecimiento adecuado para el cultivo, sin embargo, un control simple no es suficiente para gasto excesivo de energía para el desarrollo del cultivo.

El control óptimo tiene la solución para el problema del gasto de energía, pero surge el problema de ajustar las variables que se necesitan maximizar y cuales minimizar.

2. Métodos

Forma general al problema de control óptimo

El control óptimo de cualquier sistema debe estar basado en 3 conceptos: el modelo dinámico del sistema, un índice de desempeño y restricciones del sistema. En notación matricial, la ecuación diferencial que describe el sistema dinámico es representada mediante ecuación 1.

$$\dot{x} = f(x(t), u(t), t) \quad (1)$$

Dónde: $x(t)$ son los estados del vector, $u(t)$ es la señal de control y t es el tiempo. Un criterio para evaluar el rendimiento del sistema, esta función es definida por ecuación 2.

$$J = \phi(x(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), u(t), t) dt \quad (2)$$

Dónde: t_0 y t_f son el tiempo inicial y final respectivamente y donde el tiempo final puede ser o no fija, y L son funciones escalares, donde la condición inicial del estado $x(t_0) = x_0$ y con una señal de control $u(t)$ para $t \in [t_0, t_f]$, esto crea en el sistema una trayectoria a seguir para los estados, entonces el índice de desempeño asigna un número real para cada trayectoria del sistema. El problema fundamental del control óptimo es determinar un control admisible u^* el cual crea

en la ecuación 1 una trayectoria admisible a seguir x^* que minimice o maximice el rendimiento mostrado en la ecuación 2. Entonces u^* es llamado control óptimo y x^* la trayectoria de control óptimo.

Condición necesaria para una solución

Las restricciones (ecuación 1) son sumadas al índice de desempeño (ecuación 2) con un vector de los multiplicadores de Lagrange variantes en el tiempo $\Psi(t)$, por el cual se puede reescribir el índice de desempeño como ecuación 3.

$$J = \phi(x(t_f)) + \int_{t_0}^{t_f} [L(x(t), u(t), t) - \Psi^T f(x(t), u(t), t) - \dot{x}] dt \quad (3)$$

Entonces, es definida una función Hamiltoniana escalar (ecuación 4), la cual depende del vector de variables de estado, la señal de control y del nuevo vector (t).

$$H(x(t), u(t), \Psi(t), t) = L(x(t), u(t), t) + \Psi(t) f(x(t), u(t), t) \quad (4)$$

Considerando ahora una variación infinitesimal en $u(t)$, $\delta u(t)$. Esta variación produce una variación en la trayectoria de los estados $\delta x(t)$ y una variación en el índice de desempeño δJ . Si $x(t_0)$ es especificada, entonces $\delta x(t_0)$ también puede ser especificada. Esta variación puede ser calculada mediante ecuación 5.

$$\delta J = \Psi^T(t_0) \delta x(t_0) + \int_{t_0}^{t_f} \left[\frac{\partial H}{\partial u} \delta u \right] dt \quad (5)$$

Para evitar tener que determinar las funciones $\delta x(t)$ producidas por $\delta u(t)$ se eligen los multiplicadores $\Psi(t)$ de tal manera que los coeficientes de $\delta x(t)$ y $\delta x(t_f)$ en la ecuación anterior desaparezcan. Estas ecuaciones se consideran los co-estados. Eligiendo entonces:

$$\dot{\Psi}^T = -\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\partial L}{\partial x} - \Psi^T \frac{\partial f}{\partial x} \quad (6)$$

Y la condición final puede ser obtenida como:

$$\Psi^T(t_f) = \frac{\partial \phi}{\partial x}(t_f) \quad (7)$$

Para una solución estacionaria, se requiere que el índice de desempeño tenga una variación igual a cero, $\delta J(t)$, esto sucede cuando:

$$\frac{\partial H}{\partial u} = \frac{\partial L}{\partial u} + \Psi^T \frac{\partial f}{\partial u} \quad (8)$$

De la ecuación 8 es posible obtener el control de la función Hamiltoniana, la forma de este control depende de la variable $\Psi(t)$ en cada instante de tiempo. Entonces para encontrar el vector $u(t)$, se debe resolver el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \\ \dot{\Psi}(t) = -\frac{\partial H^T}{\partial x} \end{cases} \quad (9)$$

En este sistema la primera parte de la ecuación 9, las condiciones iniciales están dadas en $t = t_o$, y la segunda parte de la ecuación tiene condiciones finales en $t = t_f$, por lo cual lo convierte en un problema de valores en ambas fronteras. Se aprecia que las ecuaciones de los estados $x(t)$ y los co-estados $\Psi(t)$ en la ecuación 9 están acopladas, por esta razón $u(t)$ depende de $\Psi(t)$.

Modelo dinámico del cultivo y del invernadero

El ambiente de desarrollo y el cultivo está estrictamente conectado, por eso es necesario seleccionar adecuadamente las ecuaciones que describen el desarrollo del cultivo, a continuación, se describen los principales estados:

Modelo dinámico del cultivo

El modelo dinámico del microclima en un invernadero cubre muchos aspectos, estos aspectos describen el desarrollo fonológico e incrementa el peso seco vegetativo del cuerpo de la planta [1]. Por esa razón, las principales variables de estado del modelo reducido [2] fueron elegidas de la siguiente manera:

- *Número de Nodos*: Este estado representa el promedio del desarrollo de la planta, y esta variable de estado fue modelada como la velocidad de crecimiento por día:

$$\frac{d}{dt}N = N_m f_n(T_g) \quad (10)$$

donde: N_m es la velocidad de crecimiento de la planta, $f_n(T_g)$ es la función que modifica el promedio de desarrollo, la cual depende de la temperatura y esta temperatura se asume que depende del tiempo t con base en horas. La función f_n fue calculada para el norte de Puebla.

- *Biomasa seca del Dosel*: El desarrollo de la biomasa es calculado por la fotosíntesis:

$$\frac{d}{dt}W_c = E \left(P_g - R_m(W_r + W_c) \right) f_c \quad (11)$$

Esta variable de estado describe la velocidad de crecimiento del fruto, E es la eficiencia de conversión del tejido de la planta, P_g la velocidad de la fotosíntesis bruta del dosel, R_m es la velocidad de respiración de mantenimiento, f_c función de la partición de la biomasa a las raíces en función del desarrollo, W_c biomasa del dosel.

- *Biomasa seca de la raíz*: Sin embargo, la biomasa seca del dosel no es suficiente, el desarrollo de la masa necesita la variable de estado de la raíz, porque es un complemento que describe la acumulación de la biomasa durante el desarrollo.

$$\dot{W}_r = E \left(P_g - R_m(W_r + W_c) \right) (1 - f_c) \quad (12)$$

Ambas ecuaciones es el resultado de varias variables, donde la principal función es la fotosíntesis, y los parámetros son:

$$P_g = D \frac{\tau C_p(T_g)}{K} \ln \left[\frac{\alpha K I_o + (1 - m)\tau C}{\alpha K I_o e^{KLAI} + (1 - m)\tau C} \right] \quad (13)$$

$$p(T_g) = \left[1 - \left(\frac{\phi_h - T_g}{\phi_h - \phi_1} \right)^2 \right] \quad (14)$$

$$LAI = \frac{\rho \delta}{\beta} \ln(1 + e^{\beta(T_g - n_b)}) \quad (15)$$

Todos los parámetros fueron determinados del área en la sierra norte de Puebla.

Modelo dinámico del invernadero

Temperatura al interior del invernadero: El modelo describe el balance de la energía, estos fueron determinado por el flujo de energía como la radiación solar entrante, la pérdida del calor a través de las paredes, el techo y el suelo [3], el modelo describe los estados más importantes para el desarrollo del crecimiento del tomate:

$$C_g \frac{d}{dt} T_g = k_v(T_o - T_g) + Q_{\text{cañal}} + k_r(T_o - T_g) + k_s(T_s - T_g) + I_o \quad (16)$$

Donde T_g es la temperatura del aire en el invernadero, I_o es la radiación solar entrante, C_g la capacidad calorífica del aire en el invernadero, k_v coeficiente de transferencia de calor de la pared, k_r coeficiente de transferencia de calor del techo, k_s coeficiente de transferencia de calor del suelo, T_o la temperatura del aire en el exterior, T_s la temperatura del suelo en el invernadero.

Humedad relativa: La ecuación del vapor del aire describe la condensación y transpiración, esta variable de estado es usualmente una variable de control para plagas y enfermedades, el aire es conservado en el invernadero por el plástico que lo cubre, entonces solo hay una sola fuente de vapor en la transpiración del cultivo, con esta variable de control:

$$\frac{d}{dt} V_i = \frac{A_g}{v_g} (E_t - G_v(V_i - V_o)) \quad (17)$$

Donde V_i es la concentración de humedad dentro del invernadero, V_o es la concentración de la humedad fuera del invernadero, G_v es el flujo de ventilación a través de las ventanas, $\frac{A_g}{v_g}$ es igual a el promedio de la altura en el invernadero, E_t es la transpiración, la cual fue desarrollada por [4], la cual describe la mayor absorción de agua por la planta usa en la transpiración y descrita por:

$$E_t = \frac{2LAI}{(1 + \epsilon)r_b + r_s} \left[VCD + \frac{\epsilon r_b R_n}{2LAI \lambda} \right] \quad (18)$$

Donde ϵ es el promedio del contenido de calor latente a calor sensible del aire saturado para un cambio de un grado Celsius en la temperatura, VCD es la concentración de vapor de aire, λ es el calor latente de la vaporización del agua,

r_b es la resistencia de la transferencia de calor de los extremos de la hoja al cuerpo, r_s la resistencia estomática, R_n la radiación neta del cultivo.

Modelo dinámico completo

Todas las ecuaciones descritas fueron elegidas en base en varios modelos matemáticos de un orden alto, estas ecuaciones o variables de estado describen los principales comportamientos observados en el cultivo del desarrollo del tomate en un invernadero, entonces:

$$\dot{N} = N_m f_N(T_g) \quad (19)$$

$$\dot{W}_c = E(P_g - R_m(W_r + W_c))f_c \quad (20)$$

$$\dot{W}_r = E(P_g - R_m(W_r + W_c))(1 - f_c) \quad (21)$$

$$\dot{T}_g = \frac{1}{C_g} (k_v(T_o - T_g) + Q_{calif} + k_r(T_o - T_g) + k_s(T_s - T_g) + I_o) \quad (22)$$

$$\dot{V}_i = \frac{A_g}{v_g} (E_t - G_v(V_i - V_o)) \quad (23)$$

Todas las variables de estado están ligadas a la temperatura dentro del invernadero, por esa razón esta variable de estado es la más importante del sistema, la temperatura T_g describe el desarrollo de todas las variables de estado del sistema dinámico, por eso si Q_{calif} es controlada, todo el sistema tendrá un buen desarrollo e incrementará el desarrollo del cultivo, así escoger un buen comportamiento Q_{calif} reduce la energía usada por los nodos, la biomasa seca del dosel y la biomasa seca de la raíz.

Diseño y simulación de la ley de control

Después de obtener la ley de control óptimo, es necesario sintetizar la ley de control, la cual consiste en elegir el índice de desempeño donde sea posible obtener un sistema de variable de estado adjunta, de este método obtener la condición inicial y final del sistema. Para realizar las síntesis del control es necesario conocer los valores de los parámetros implicados, por eso el sistema es cercano a la realidad. Se sustituye en (8) con los valores de las condiciones

climáticas existentes en el estado de Puebla y (9) muestra el modelo del microclima.

Con las variables de estado, el criterio de evaluación:

$$J = \frac{1}{2} \left(N^2(t_f) + W_r^2(t_f) + W_c^2(t_f) \right) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \left(-N^2(t) - W_r^2(t) - W_c^2(t) + Q_{caiesf}^2(t) \right) dt \quad (24)$$

El cual minimiza la energía con la variable Q_{caiesf} y maximiza cómo es posible el número de nodos (N) y la biomasa total (W_c y W_r).

El Hamiltoniano es construido de la siguiente manera:

$$H = \frac{1}{2} \left(-N^2(t) - W_r^2(t) - W_c^2(t) + Q_{caiesf}^2(t) - V_i^2(t) \right) + \lambda_1(t) \dot{N}(t) + \lambda_2(t) \dot{W}_c(t) + \lambda_3(t) \dot{W}_r(t) + \lambda_4(t) \dot{V}_1(t) + \lambda_5(t) \dot{V}_2(t) \quad (25)$$

Por tanto, el sistema auxiliar de co-estados:

$$-\dot{\lambda}_1 = -N \quad (26)$$

$$-\dot{\lambda}_2 = -\lambda_2 E R_m f_c - \lambda_3 E R_m (1 - f_c) - W_c \quad (27)$$

$$-\dot{\lambda}_3 = -\lambda_2 E R_m f_c - \lambda_3 E R_m (1 - f_c) - W_r \quad (28)$$

$$-\dot{\lambda}_4 = \frac{\partial}{\partial T_g} \left[\lambda_1 \dot{N} + \lambda_2 \dot{W}_c + \lambda_3 \dot{W}_r + \lambda_4 \dot{T}_g + \lambda_5 \dot{V}_1 \right] \quad (29)$$

$$-\dot{\lambda}_5 = -\lambda_5 \frac{A_g}{v_g} G_v \quad (30)$$

Donde de la ecuación 29:

$$\frac{\partial}{\partial T_g} [\lambda_1 \dot{N}] = \lambda_1 \frac{\partial}{\partial T_g} f_N(T_g) \quad (31)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_g} [\lambda_2 \dot{W}_c] = \lambda_2 E \left[\frac{\partial}{\partial T_g} P_g - \frac{\partial}{\partial T_g} R_m (W_c + W_r) \right] f_c \quad (32)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_g} [\lambda_3 \dot{W}_r] = \lambda_3 E \left[\frac{\partial}{\partial T_g} P_g - \frac{\partial}{\partial T_g} R_m (W_c + W_r) \right] f_c \quad (33)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_g} [\lambda_4 \dot{T}_g] = -\lambda_4 \frac{k_v + k_r + k_s}{C_g} \quad (34)$$

$$\frac{\partial}{\partial T_g} [\lambda_5 \dot{V}_1] = \lambda_5 \frac{A_g}{v_g} \frac{\partial}{\partial T_g} E_t \quad (35)$$

Donde

$$\frac{\partial}{\partial T_g} P_g = 2 \left(\frac{T_g - \phi_h}{\phi_h - \phi_1} \right) \left(\frac{P_g}{p(T_g)} \right) + D \frac{\tau C p(T_g)}{K} \frac{\alpha K^2 I_o \rho \delta e^{\beta(T_g - n_b)} e^{-KLAI}}{(\alpha K I_o e^{KLAI} + (1 - m)\tau C)(1 + e^{\beta(T_g)})} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial T_g} E_t = 2 & \left[((1 + \epsilon)r_b + r_s) \frac{\partial}{\partial T_g} LAI - LAI \left(\left(1 + \frac{\partial}{\partial T_g} \epsilon \right) r_b + \frac{\partial}{\partial T_g} r_s \right) \right] \left[VCD + \frac{\epsilon r}{2i} \right. \\ & + \frac{r_b}{\lambda((1 + \epsilon)r_b + r_s)LAI^2} \left[LAI \left(\epsilon \frac{\partial}{\partial T_g} R_n + R_n \frac{\partial}{\partial T_g} \epsilon \right) - \epsilon R_n \frac{\partial}{\partial T_g} LAI \right. \\ & \left. \left. + \frac{2LAI}{(1 + \epsilon)r_b + r_s} \frac{\partial}{\partial T_g} VCD \right] \right] \quad (37) \end{aligned}$$

Y obteniendo la solución, la cual describe cómo será la variable de control Q_{calcf} :

$$\frac{\partial}{\partial u} H = Q_{calcf} + \lambda_4 = 0 \quad (38)$$

$$Q_{calcf} = -\lambda_4 \quad (39)$$

El sistema dinámico cultivo-microclima se presenta a continuación:

$$\dot{N} = N_m f_N(T_g) \quad (40)$$

$$\dot{W}_c = E(P_g - R_m(W_r + W_c))f_c \quad (41)$$

$$\dot{W}_r = E(P_g - R_m(W_r + W_c))(1 - f_c) \quad (42)$$

$$\dot{T}_g = \frac{1}{C_g} (k_v(T_o - T_g) - \lambda_4 + k_r(T_o - T_g) + k_s(T_s - T_g) + I_o) \quad (43)$$

$$\dot{V}_i = \frac{A_g}{v_g} (E_t - G_v(V_i - V_o)) \quad (44)$$

$$\dot{\lambda}_1 = N \quad (45)$$

$$\dot{\lambda}_2 = \lambda_2 E R_m f_c + \lambda_3 E R_m (1 - f_c) + W_c \quad (46)$$

$$\dot{\lambda}_3 = \lambda_2 E R_m f_c + \lambda_3 E R_m (1 - f_c) + W_r \quad (47)$$

$$\dot{\lambda}_4 = \frac{\partial}{\partial T_g} [\lambda_1 \dot{N} + \lambda_2 \dot{W}_c + \lambda_3 \dot{W}_r + \lambda_4 \dot{T}_g + \lambda_5 \dot{V}_i] \quad (48)$$

$$\dot{\lambda}_5 = \lambda_5 \frac{A_g}{v_g} G_v \quad (49)$$

El sistema anterior tiene la consideración de reducir la energía necesaria para controlar la variable Q_{calcf} , para controlar el modelo dinámico descrito en la sección anterior.

3. Resultados

El modelo dinámico fue simulado durante 80 días, y con la siguiente consideración:

- Para la simulación se considera la radiación solar, como se muestra a continuación

$$I_o = \begin{cases} I_m \text{sen}(2\pi(t_d - 6)) & I_o > 0 \\ 0 & I_o \leq 0 \end{cases} \quad (50)$$

Esta función representa la radiación solar durante el día, por eso no se considera una función sinusoidal completa, debido principalmente a que incrementa y disminuye la radiación solar desde el amanecer hasta el crepúsculo, donde el máximo de la función es en el medio día, aproximadamente las 12 pm.

- Otras consideraciones son algunas variables como contantes, como la temperatura del aire al exterior del microclima, la temperatura del suelo, incluso la apertura de las ventanas, por tanto, el flujo de aire a través de las ventanas es contante.
- La simulación del modelo dinámico se realizó en 2 etapas, la primera no considera el control y la segunda incluye el control diseñado.
- La simulación del modelo dinámico arroja un crecimiento considerable para los nodos y biomasa total del sistema (figura 1), una humedad relativa de forma sinusoidal entre 80% y 87%, el modelo con el control optimo tiene una mejora significativa, esto es un 10% más de nodos por metro cuadrado y 25% de la biomasa total (la suma de la biomasa del dosel y biomasa de la raíz).

La temperatura al interior del invernadero es mayor en el modelo optimizado que en el modelo sin optimizar (superior figura 2), solo durante el día diurno, y no durante la noche, donde la temperatura es la misma durante ese periodo, el desarrollo se debe principalmente a la naturaleza de la ecuación de los nodos, donde se necesita maximizar el desarrollo de crecimiento.

La parte inferior de la figura 2 muestra el comportamiento de la energía que debe suministrarse en la variable de control Q_{calef} , representada en Watts sobre metro

cuadrado. Dicha variable de control es vital para el propósito de una implementación física del sistema de control óptimo, da la pauta a un diseño de transferencia de calor, en este caso con un sistema que suministre menos de 1500 W/m^2 podrá garantizar una cosecha óptima y reducir el consumo de energía. El control desarrollado previamente tiene la ventaja de reducir los costos al utilizar la energía necesaria para seguir la trayectoria óptima de las variables de estados del sistema dinámico, en vez de un control típico, el cual su gasto energético no es su punto y por tanto poco minimizado.

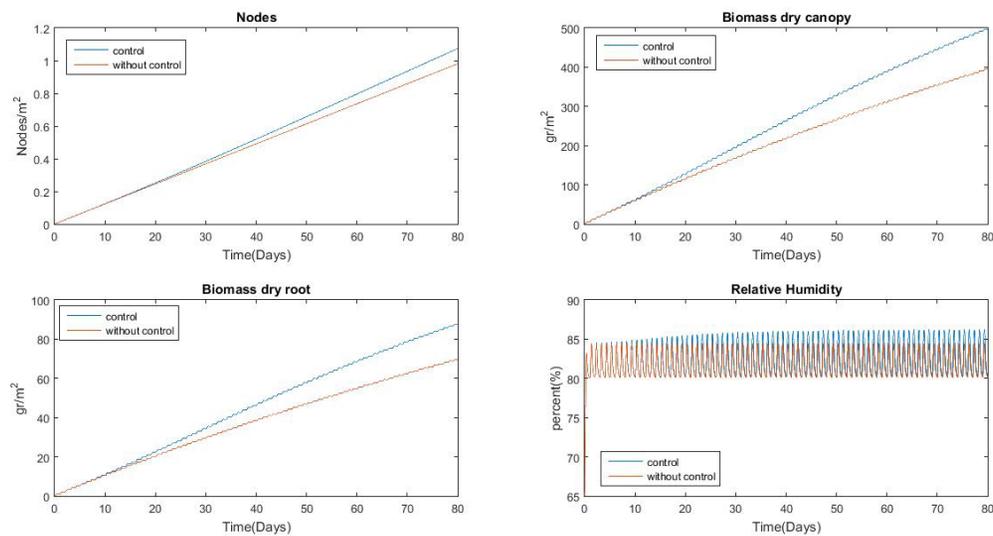


Figura 1 Comportamiento: Nodos, Biomasa del dosel de la raíz, and HR.

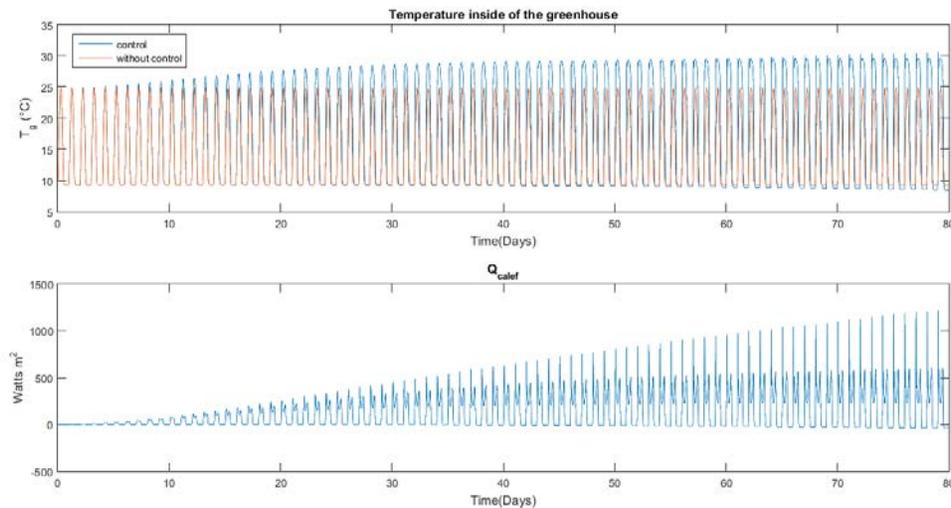


Figura 2 Temperatura al interior del invernadero y la variable de control.

Discusión

La teoría de control óptimo se aplicó a un modelo cuyos parámetros son exclusivos de la región norte del estado de Puebla, sin embargo, la metodología presentada en este artículo se puede generalizar adecuadamente.

La ley de control óptima para el sistema de calefacción (traducido en Watts) se obtuvo para un periodo de cosecha de 80 días y su aplicación aumenta la producción del cultivo según la simulación realizada. Además de que la Humedad relativa presenta un rango bastante aceptable.

Lo anterior abre una gran expectativa para realizar el diseño del sistema de calefacción y su aplicación real en un invernadero, con un consumo mínimo de energía.

5. Bibliografía y Referencias

- [1.] Jones, J.W; Dayan. E; Allen, L.H; Van Keulen H.; Challa, H. "Adynamic tomato growth and yield model". Transaction of the ASEA, 663-672,1991.
- [2.] Jones J.W; Kenig, A; Vallejos, C.E. "Reduced State- Variable Tomato Growth Model", America Society of Agricultural Engineers, 255-265,1999.
- [3.] Tap F "Economics-based optimal control of greenhouse tomato rop prod"., PhD Thesis, Wageningen Arg. Univ, 2000.
- [4.] J. Bontsema, J. Hemming, C. Stanghellini. "On-line monitoring van transpiratie en fotosyntheseactiviteit", Wageningen Ur, note 45. 2007.