

Optimización Dinámica del Enriquecimiento de Dióxido de Carbono del Tomate de Microclima.

J. E. Moisés Gutiérrez Arias
Nubia Ilia Ponce de León Puig
Eladio Flores Mena
Montserrat Morín Castillo

Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de
Puebla, Av. San Claudio y 18 Sur, Col. San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue.,
México.

*jpgutierrez@ece.buap.mx, nubiliaponcepuig@gmail.com, eflores@ece.buap.mx,
mmorin@ece.buap.mx*

Resumen

Un control óptimo para el enriquecimiento del dióxido de carbono en un microclima se puede obtener a partir del modelo matemático del cultivo del tomate y del microclima. Se considera un modelo de 4 estados: la biomasa estructural de las hojas y los frutos, la biomasa no estructural de los nutrientes y el dióxido de carbono. También se selecciona un indicador de desempeño con la finalidad de aumentar el beneficio del agricultor al obtener un ahorro en el consumo de energía y una mayor producción. La ley de control deducida en este trabajo se simula durante un periodo de dos semanas y se compara con la función rampa como entrada de control.

Keywords: Microclima, dióxido de carbono, biomasa estructural de las hojas, biomasa estructural de los frutos, control óptimo, indicador de desempeño, espacio de estados.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años se han hecho muchos esfuerzos para desarrollar avanzados sistemas de control de clima en los invernaderos (Aikman, 1996; Ioslovich, Seginer, 1995, 1998; Seginer, Ioslovich, 1998; Tchamitchian, Ioslovich, 1998; Van Straten et al., 2000; Van Henten, 1994). Se han propuesto diferentes métodos de control óptimo aunque casi no han sido utilizados en la práctica debido a la complejidad de la aplicación (Van Straten et al., 2000). El buen desarrollo de un cultivo se basa en diferentes variables, todas ellas igual de importantes, pero en esta investigación la variable que nos interesa es el dióxido de carbono. El enriquecimiento de CO₂ se practica en los cultivos de microclima con la finalidad de aumentar el rendimiento y el beneficio. Se han hecho estudios que demuestran que el enriquecimiento de CO₂ aumenta la fotosíntesis neta de las plantas lo que provoca el aumento del peso seco, altura de la planta y el número de hojas y ramas (Mortensen, 1987). Otro estudio demostró que el enriquecimiento de CO₂ provoca cambios físico-químicos en el cultivo como la firmeza o el color (Md. Shahidul et al., 1996).

El método de análisis como herramienta proporciona un marco matemático para una estrategia óptima, este método se basa generalmente en los modelos de ventilación, fotosíntesis, materia seca y tasa de producción. La trayectoria óptima de CO₂ obtenida depende de los modelos utilizados. Para este trabajo la concentración de CO₂ se expresó como una función algebraica de la radiación, velocidad del viento y apertura de las ventilas.

En la figura (1) se muestran los datos obtenidos a partir de tres formas de control. Los datos finales incluyen la producción de cosecha, el consumo de energía, el consumo de dióxido de carbono y la ganancia económica regresada al agricultor. Para obtener estos resultados se simularon 3 diferentes formas de control: el control tradicional que practica el agricultor directamente, el control óptimo 1 aplicado a la humedad y el control óptimo 2 con una estrategia de control de ventilación (Van Straten et al., 2011). En resumen, la figura (1) representa la comparación de diferentes controles aplicados a un cultivo y se puede notar que los controles óptimos aumentan la producción y reducen gastos por consumo de energía, mientras que en el control tradicional se consume más energía y CO₂, y se obtiene menor ganancia.

Se han desarrollado una serie de estrategias óptimas para el enriquecimiento de CO₂ (Challa, Schapendonk, 1984; Nederhoff, 1988), las cuales se sustentan en la reducción de gastos por consumo de energía, reducción en el consumo de CO₂ y un aumento en la producción.

Uno de los objetivos principales de este trabajo es contribuir con el problema de control óptimo y su implementación en tiempo real. Se eligió el tomate por ser uno de los productos agrícolas más importantes de nuestro país. Para lograr los objetivos planteados se parte del modelo dinámico conjunto del tomate y del microclima tomando en cuenta las variables de peso seco de la planta y del fruto, la disponibilidad de nutrientes y la cantidad de dióxido de carbono.

Este documento es la base de investigación para ayudar a obtener un sistema electrónico, en el cual ya se está trabajando, que controla el flujo de CO₂ en un microclima

de tomate basado en una ley de control óptimo con la finalidad de aumentar la producción y disminuir gastos.

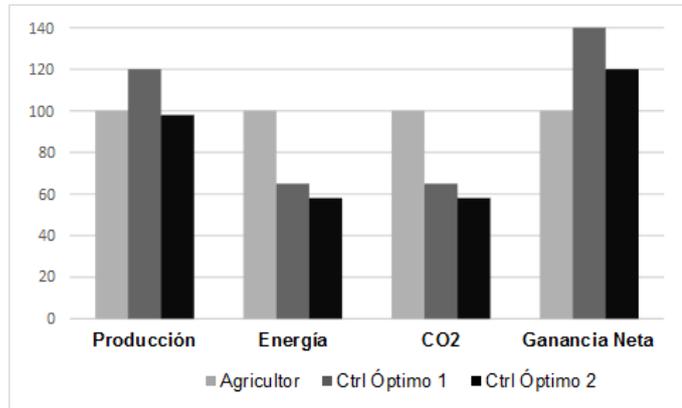


Figura 1. Comportamiento del consumo de energía, consumo de CO2, producción y ganancia neta con diferentes estrategias de control en un microclima.

2. FORMULACIÓN GENERAL DEL PROBLEMA DE CONTROL ÓPTIMO

El control óptimo de cualquier sistema, en este caso de un microclima, debe estar basado en tres aspectos: el modelo dinámico del sistema, una función de desempeño y restricciones físicas del sistema. En notación matricial la ecuación de estados se representa como sigue:

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

Donde $x(t)$ es el vector de estados y $u(t)$ es la entrada de control. La ecuación (1) representa a las restricciones físicas del sistema. Se requiere de un criterio para evaluar el desempeño del sistema, normalmente el funcional de desempeño está definido como:

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

donde t_0 y t_f son el tiempo inicial y tiempo final, ϕ y L son funciones escalares, t_f puede ser fijo o libre. Comenzando en el estado inicial $x(t_0) = x_0$ y aplicando la señal de control $u(t)$ para $t \in [t_0, t_f]$ se logra que el sistema siga alguna trayectoria de estados, entonces el índice de desempeño asigna un número real único a cada trayectoria del sistema. El problema fundamental del control óptimo se reduce a determinar un control admisible u^* el cual provoque que la ecuación (1) siga una trayectoria admisible x^* que minimice la medida de desempeño mostrada en la ecuación (2). Entonces, u^* es llamado control óptimo y x^* es una trayectoria óptima.

Condiciones necesarias para una solución estacionaria.

Se añaden las restricciones (1) al funcional de desempeño (2) con un vector de multiplicadores de Lagrange variantes en el tiempo $\Psi(t)$ (vector de estados adjunto), y se define la función escalar Hamiltoniana, en donde deben estar involucradas las variables del sistema, las variables adjuntas y la entrada de control:

$$H(x(t), u(t), \Psi(t), t) = L(x(t), u(t), t) + \Psi^T(t)f(x(t), u(t), t). \quad (3)$$

Se considera una variación infinitesimal en $u(t)$ denominada como $\delta u(t)$, dicha variación produce un cambio en la función de desempeño δJ . Si $x(t_0)$ está especificada, entonces $\delta x(t_0)$ también lo está. El vector de las variables adjuntas $\Psi(t)$ se elige haciendo:

$$\dot{\Psi}^T = -\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\partial L}{\partial x} - \Psi^T \frac{\partial f}{\partial x}, \quad (4)$$

Con las condiciones de frontera: $\Psi^T(t_f) = \frac{\partial \phi}{\partial x}(t_f)$. Para una solución estacionaria se requiere que la función de desempeño con una variación arbitraria sea igual a cero, $\delta J = 0$. Esto solo se cumple si se cumple la ecuación de condición estacionaria:

$$\frac{\partial H}{\partial u} = \frac{\partial L}{\partial u} + \Psi^T \frac{\partial f}{\partial u} = 0, \quad (5)$$

Para hallar la función vector de control $u(t)$ que produce un valor estacionario de la función de desempeño debe resolverse el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t), \\ \dot{\Psi}(t) = -\frac{\partial H^T}{\partial x}, \end{cases} \quad (6)$$

Este es un problema con valores en la frontera de dos puntos. Es importante notar que las ecuaciones que describen a los estados $x(t)$ y estados adjuntos $\Psi(t)$ en la ecuación (6) están acopladas, dado que $u(t)$ depende de $\Psi(t)$ a través de la condición estacionaria y los estados adjuntos dependen de $x(t)$ y $u(t)$. Note también que la primera ecuación involucra las condiciones iniciales $t = t_0$ y la segunda involucra las condiciones finales $t = t_f$.

3. MODELO MATEMÁTICO DEL CULTIVO

El modelo en el espacio de estados del tomate consta de tres estados principales relativos al cultivo (Van Straten et al., 2011):

- Balance de Biomasa de Nutrientes.
- Balance de Biomasa de Hojas.
- Balance de Biomasa de Frutos.

Los balances de masa básicos pueden expresarse de la siguiente manera:

- Nutrientes:

$$\frac{dW_B}{dt} = P - G_V - \theta_V G_V - G_F - \theta_F G_F - R_{B,V} - R_{B,F}, \quad (7)$$

- Hojas:

$$\frac{dW_V}{dt} = G_V - R_{V,V} - H_L, \quad (8)$$

- Frutos:

$$\frac{dW_F}{dt} = G_F - R_{F,F} - H_F, \quad (9)$$

donde: + Producción de nutrientes por fotosíntesis (P).
 - Conversión de nutrientes a biomasa vegetal por crecimiento (G_V).
 - Uso de nutrientes como energía para propiciar el crecimiento vegetal ($\theta_V G_V$).
 - Conversión de nutrientes en frutos por crecimiento (G_F).
 - Uso de nutrientes como energía para propiciar el crecimiento del fruto ($\theta_F G_F$).
 - Consumo de nutrientes para el mantenimiento de las

partes vegetales ($R_{B,V}$).

- Consumo de nutrientes para el mantenimiento de los frutos ($R_{B,F}$).
- Uso de la biomasa para mantenimiento cuando hay una carencia de nutrientes ($R_{V,V}$).
- Tasa de deshoje (H_L).
- Uso de la biomasa para mantenimiento cuando hay una carencia de nutrientes ($R_{F,F}$).
- Tasa de cosecha (H_F).

3.1 Balance de Biomasa de Nutrientes

Denotando como W_B el total de nutrientes en el follaje de la planta, expresado como peso seco por unidad de área se tiene la siguiente ecuación de balance de masa:

$$\frac{dW_B}{dt} = P - h\{\cdot\} \left(\frac{(1 + \theta_V)}{z} G_L^{dem} + (1 + \theta_F) G_F^{dem} \right) - h\{\cdot\} \left(\frac{R_L}{z} + R_F \right). \quad (10)$$

La ecuación de balance de biomasa de nutrientes (10), puede tomar dos valores (11,) dependiendo del parametro de abundancia de nutrientes $h\{\cdot\}$, donde la primera expresión se toma cuando hay abundancia de nutrientes $h\{\cdot\} = 1$ y la segunda cuando hay escasez de nutrientes $h\{\cdot\} = 0$.

$$\frac{dW_B}{dt} = \begin{cases} P - \frac{(1 + \theta_V)}{z} G_L^{dem} - (1 + \theta_F) G_F^{dem} - \frac{R_L}{z} - R_F, \\ P, \end{cases} \quad (11)$$

donde:

R_F es la demanda de respiración de mantenimiento de los frutos.

G_L^{dem} es la demanda de crecimiento de las hojas.

G_F^{dem} es la demanda del crecimiento del fruto.

P es la tasa global de fotosíntesis en el follaje expresada en peso seco por unidad de área.

z es el termino que involucra el modelo de la parte vegetal.

$h\{\cdot\}$ es la abundancia de nutrientes.

3.2 Balance de Biomasa de Hojas

El crecimiento de las hojas es igual a la cantidad de nutrientes convertida a biomasa estructural de hojas en el follaje de la planta y está dado por $h\{\cdot\} G_L^{dem}$. El incremento en la biomasa de las hojas siempre va acompañado de crecimiento en el tallo y hojas aunque estos no estén incluidos en el modelo. Si hay una carencia de nutrientes, el crecimiento se detiene, normalmente los nutrientes se utilizan para el mantenimiento, pero en caso de escasez de estos, el mantenimiento en el modelo se emplea en las partes estructurales de la planta (hojas y frutos). Así, el balance de biomasa de hojas por unidad de área se expresa como:

$$\frac{dW_L}{dt} = h\{\cdot\} G_L^{dem} - (1 - h\{\cdot\}) R_L - H_L, \quad (12)$$

Dependiendo de la abundancia de nutrientes $h\{\cdot\}$, la ecuación (12) de balance de biomasa de las hojas puede tomar dos valores:

$$\frac{dW_L}{dt} = \begin{cases} G_L^{dem} - H_L, & \text{si } h\{\cdot\} = 1, \\ -R_L - H_L, & \text{si } h\{\cdot\} = 0. \end{cases} \quad (13)$$

3.3 Balance de Biomasa de Frutos

De manera similar al caso de la biomasa de las hojas, el crecimiento de los frutos en la planta a partir de los nutrientes asimilados está dado por $h\{\cdot\} G_F^{dem}$.

$$\frac{dW_F}{dt} = h\{\cdot\} G_F^{dem} - (1 - h\{\cdot\}) R_F - H_F, \quad (14)$$

Finalmente la ecuación (14) de balance de biomasa de frutos puede tomar dos valores distintos, en función del valor del parámetro de abundancia de nutrientes $h\{\cdot\}$.

$$\frac{dW_F}{dt} = \begin{cases} G_F^{dem} - H_F, & \text{si } h\{\cdot\} = 1, \\ -R_F - H_F, & \text{si } h\{\cdot\} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

4. MODELO MATEMÁTICO DEL MICROCLIMA

4.1 Balance de Energía del Dióxido de Carbono al Interior del Invernadero

El balance de energía del dióxido de carbono dentro del invernadero, está dada por la ecuación (Van Straten et al., 2011):

$$\frac{V_g}{A_g} \frac{dC_{CO_2}}{dt} = -\eta_{CO_2/dw} P + \eta_{CO_2/dw} R - \varphi_{CO_2,g-o}^{vent} + u_{CO_2}, \quad (16)$$

A continuación se describe cada término:

- * Cantidad de dióxido de carbono tomado del aire del invernadero por la fotosíntesis de las plantas:

$$\eta_{CO_2/dw} P,$$

- * Cantidad de dióxido de carbono regresado al aire del invernadero por la respiración de las plantas:

$$\eta_{CO_2/dw} R,$$

donde:

$\eta_{CO_2/dw}$, es la cantidad de dióxido de carbono necesario para formar una unidad de biomasa.

El término $\frac{V_g}{A_g}$ es la razón del volumen del invernadero por unidad de área del suelo del invernadero.

- * Pérdida de masa de dióxido de carbono por ventilación:

$$\varphi_{CO_2,g-o}^{vent} = u_V (C_{CO_2} - C_{CO_2-o}),$$

- * Suministro de dióxido de carbono:

$$u_{CO_2} = u_{CO_2}^{Vp} \varphi_{CO_2,in-g}^{max}$$

donde: $u_{CO_2}^{Vp}$, es la apertura de válvula de suministro.

$\varphi_{CO_2,in-g}^{max}$, es la máxima tasa de flujo de dióxido de carbono. En este modelo descrito para el microclima, la posición de la válvula de suministro de dióxido de carbono se maneja como la entrada de control. Por ello, esta se refiere directamente al actuador presente de manera física en el microclima.

5. SÍNTESIS DEL CONTROL ÓPTIMO

Consideramos el sistema formado por las ecuaciones de estado (11), (13), (15) y (16); las primeras tres relativas al

cultivo y la cuarta relativa al microclima (concentración de CO_2). Los valores en dichas ecuaciones se han sustituido de acuerdo a la tabla de términos del modelo matemático (tabla 1) (?) y a la tabla de parámetros físicos (tabla 2), de los cuales, algunos se obtuvieron con ayuda de la experiencia de los agricultores, y otros se investigaron de acuerdo a las condiciones climáticas de la zona geográfica del país. Note que las tres ecuaciones relacionadas con el cultivo se toman con la suposición de que hay abundancia de nutrientes ($h\{\cdot\} = 1$). Al realizar las sustituciones pertinentes se obtiene lo siguiente:

$$\begin{cases} \dot{W}_L = 2,2996 \times 10^{-6} W_L, \\ \dot{W}_F = 4,3925 \times 10^{-6} W_F, \\ \dot{W}_B = P - 5,39 \times 10^{-6} W_L - 5,92 \times 10^{-6} W_F, \\ 3C_{CO_2} = 1,0266(R - P) + 0,155 \times 10^{-10} u_{CO_2}^{vp}, \end{cases} \quad (17)$$

De igual forma, al usar las tablas (1) y (2) para sustituciones se llega a que P y R tienen la siguiente forma:

$$P = \frac{3,7192 \times 10^{-11} W_L^{2,511}}{1,6353 \times 10^{-9} + 4,0439 \times 10^{-5} W_L^{2,511}},$$

$$R = 1,5942 \times 10^{-6} W_F + 0,4856 \times 10^{-6} W_L + 1,668 \times 10^{-7}.$$

Se considera el funcional (2) y se obtiene la forma del índice de desempeño en el que ya están involucradas las variables del sistema::

$$J = \frac{1}{2} \left[W_L^2(t_f) + W_F^2(t_f) + W_B^2(t_f) + C_{CO_2}^2(t_f) + \int_{t_0}^{t_f} [W_L^2 + W_F^2 + W_B^2 + C_{CO_2}^2 + (u_{CO_2}^{vp})^2] dt \right], \quad (18)$$

el primer término del indicador de desempeño involucra las cuatro primeras variables en el momento final y en la integral ya se involucra la entrada de control. El planteamiento es minimizar el índice de desempeño (18), sujeto al sistema de ecuaciones (17).

5.1 Descripción del Método de Solución

La función escalar hamiltoniana, se obtiene al considerar la relación (3), en concordancia con el índice de desempeño (18).

$$\begin{aligned} H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \Psi, t) &= \\ &= \frac{1}{2} [W_L^2(t) + W_F^2(t) + W_B^2(t) + C_{CO_2}^2(t) + (u_{CO_2}^{vp})^2(t)] + \\ &+ 2,2996 \times 10^{-6} W_L(t) \Psi_1(t) + 4,3925 \times 10^{-6} W_F(t) \Psi_2(t) + \\ &+ [P - 5,39 \times 10^{-6} W_L(t) - 5,92 \times 10^{-6} W_F(t)] \Psi_3(t) + \\ &+ \frac{1}{3} [1,0266(R - P) + 0,1554 \times 10^{-10} u_{CO_2}^{vp}] \Psi_4(t). \end{aligned} \quad (19)$$

El sistema de las variables adjuntas de acuerdo con la expresión dada en (4) tiene la forma:

$$\begin{cases} \dot{\Psi}_1 = W_L + 2,2996 \times 10^{-6} \Psi_1 + \frac{\partial P}{\partial W_L} \Psi_3 - \\ \quad - 5,39 \times 10^{-6} \Psi_3 + \frac{1}{3} \frac{\partial(R - P)}{\partial W_L} \Psi_4(1,0266) \\ \dot{\Psi}_2 = W_F + 4,3925 \times 10^{-6} \Psi_2 - \\ \quad - 5,92 \times 10^{-6} \Psi_3 + \frac{1}{3} \frac{\partial R}{\partial W_F} \Psi_4(1,0266), \\ \dot{\Psi}_3 = W_B, \\ \dot{\Psi}_4 = C_{CO_2}, \end{cases} \quad (20)$$

La condición estacionaria (5) proporciona la siguiente forma del control, el cual depende del cuarto estado adjunto:

$$u_{CO_2}^{vp} = -\frac{1}{3} 0,1554 \times 10^{-10} \Psi_4(t). \quad (21)$$

El sistema (17) tiene condiciones iniciales y el sistema (20) tiene condiciones finales. Los sistemas están acoplados, pues se ha sustituido la forma del control (21). Para resolver el sistema completo, como un sistema con condiciones iniciales, las ecuaciones adjuntas se consideran en el tiempo inverso, posteriormente, el comportamiento de dichas variables adjuntas se devuelven al tiempo directo. Las herramientas de MatLab, se utilizaron para elaborar el programa que resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales y proporciona el comportamiento de las ocho variables involucradas en el sistema.

6. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

6.1 Análisis Ante una Entrada Rampa

Se introduce una señal de control rampa al sistema (17) y se simula en un periodo de dos semanas, con la finalidad de poder comparar esto con los resultados obtenidos al introducir al sistema la forma de control deducida en este trabajo. El comportamiento se describe en la figura (2). En la figura se observa que la masa seca de los frutos crece más que la masa seca de las hojas, lo cual es muy aceptable. Sin embargo, es importante observar que el consumo de dióxido de carbono es muy alto, lo cual representaría gastos elevados en el consumo de energía para suministrar el CO_2 al microclima.

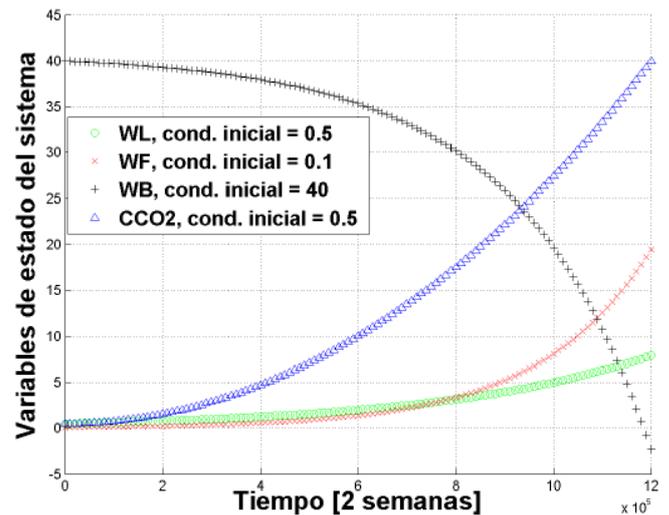


Figura 2. Comportamiento de la masa seca de los frutos, la masa seca de las hojas, los nutrientes y el flujo de dióxido de carbono ante una entrada rampa.

6.2 Análisis con el Control Sintetizado

La simulación durante dos semanas, considerando la ley de control determinada en este trabajo, se presenta en la Figura (3). En dicha figura se observa como la masa seca

Cuadro 1. Términos del modelo matemático del cultivo y del microclima.

Término	Descripción
$P = p^{max} \left(\frac{I^{PAR}}{I^{PAR} + K_I} \right) \left(\frac{C_{CO_2}}{C_{CO_2} + K_C} \right) f_m \{ \cdot \}$	Tasa global de fotosíntesis en el follaje expresada en peso seco por unidad de área
$R = h \{ \cdot \} \left(\frac{\theta_V}{z} G_L^{dem} + \theta_F G_F^{dem} \right) + \frac{R_L}{z} + R_F$	Cantidad total respirada por la planta por unidad de tiempo.
$I^{PAR} = f_{PAR/I} \tau_r I_0$	Intensidad de luz a nivel de la cosecha
$f_m \{ \cdot \} = \frac{(W_L/p_m)^m}{1 + (W_L/p_m)^m}$	Factor de madurez
$G_L^{dem} = f_{L/F}(T) k_{GF}^{ref} f_{TG}(T) f_D \{ \cdot \} W_L$	Demanda del crecimiento de las hojas
$G_F^{dem} = k_{GF}^{ref} f_{TG}(T) f_D \{ \cdot \} W_F$	Demanda del crecimiento del fruto
$f_{L/F}(T) = f_{L/F}^{ref} e^{v_2(T - T_{L/F}^{ref})}$	Factor de crecimiento de las hojas con respecto a los frutos
$f_{TG}(T) = Q_{10G} \frac{10^{T - T_G^{ref}}}{10}$	Crecimiento de los frutos dependiente de la temperatura
$f_D \{ \cdot \} = \frac{c_{f1} - c_{f2} D}{c_{f1} - c_{f2}}$	Factor de corrección en la tasa de crecimiento
$R_L = k_{RL}^{ref} f_{TR}(T) W_L$	Demanda de respiración de mantenimiento de las hojas
$R_F = k_{RF}^{ref} f_{TR}(T) W_F$	Demanda de respiración de mantenimiento del fruto
$f_{TR}(T) = Q_{10R} \frac{10^{T - T_R^{ref}}}{10}$	Función de temperatura
$k_{HL} = c_{yL} k_H$	Coefficiente variable en función de la etapa de desarrollo
$k_{HF} = c_{yF} k_H$	Coefficiente variable en función de la etapa de desarrollo
$H_L = k_{HL} W_L$	Tasa de deshoje natural de la planta
$H_F = k_{HF} W_F$	Tasa de la cosecha de la planta
$u_V = \left(\frac{p_{V1} u_V^{A_{plsd}}}{1 + p_{V2} u_V^{A_{plsd}}} + p_{V3} + p_{V4} u_V^{A_{pwsd}} \right) v + p_{V5}$	Tasa de flujo de ventilación

Cuadro 2. Parámetros físicos.

Variable	Valor	Descripción
z	0,6081	Fraccción de hojas del total de la masa vegetativa
θ_F	0,2	Factor de asimilados para el incremento de frutos por unidad
θ_V	0,23	Factor de asimilados para el incremento de la parte vegetal por unidad
p_m	$1,8 \times 10^{-2}$	Parámetro en el factor de maduración, $[kg\ m^{-2}]$
m	2,511	Parámetro en el factor de maduración
p^{max}	$2,2 \times 10^{-6}$	Tasa de fotosíntesis de la cubierta bruta máxima, $[kg\ m^{-2}\ s^{-1}]$
K_1	577	Constante Monod para PAR, $[W\ m^{-2}]$
K_c	0.211	Constante Monod para CO_2 , $[kg\ m^{-3}]$
$f_{PAR/I}$	0.475	Fracción PAR de radiación solar
τ_r	0.7	Transmitancia de la cubierta
k_{GF}^{ref}	$3,8 \times 10^{-6}$	Coefficiente de referencia de la tasa de crecimiento de la fruta, $[s^{-1}]$
T_{GF}^{ref}	20	Temperatura de referencia, $[^{\circ}C]$
Q_{10G}	1.6	Parámetro de crecimiento de la función de temperatura
$f_{L/F}^{ref}$	1.38	Factor de referencia de la partición de hoja-fruta
v_2	-0.168	Parámetro de partición de fruta-hoja, $[K^{-1}]$
$T_{L/F}^{ref}$	19	Temperatura de referencia de la partición fruta-hoja, $[^{\circ}C]$
k_{RL}^{ref}	$2,9 \times 10^{-7}$	Coefficiente de respiración de mantenimiento de las hojas, $[s^{-1}]$
Q_{10R}	2	Parámetro de respiración de la función de temperatura
T_R^{ref}	25	Temperatura de referencia para respiración, $[^{\circ}C]$
k_{RF}^{ref}	$1,2 \times 10^{-7}$	Coefficiente de respiración de mantenimiento de hojas, $[s^{-1}]$
η	0,7	Calor absorbido en relación a la energía total de la radiación neta recibida.
$\frac{V_g}{A_g}$	3	Razón del volumen del invernadero por unidad de área.
c_{yL}	0.4805	Parámetro de cosecha adimensional.
c_{yF}	1.636	Parámetro de cosecha adimensional.
C_{CO_2-0}	1.6637	Concentración de dióxido de carbono al exterior del invernadero.
$u_V^{A_{plsd}}$ y $u_V^{A_{pwsd}}$		Apertura de ventilas.
p_{v1}	$7,17 \times 10^{-5}$	Parámetro
p_{v2}	0,0156	Parámetro
p_{v3}	$2,71 \times 10^{-5}$	Parámetro
p_{v4}	$6,32 \times 10^{-5}$	Parámetro
p_{v5}	$7,40 \times 10^{-5}$	Parámetro

de los frutos, la masa secas de las hojas y los nutrientes tienen un comportamiento similar al caso en que la rampa se simuló en el sistema. Pero se resalta el hecho de que con el control obtenido en este trabajo la cantidad de dióxido de carbono se redujo significativamente lo que proporcionará beneficios prácticos al agricultor al obtener un ahorro en el consumo de energía por suministro de CO_2 .

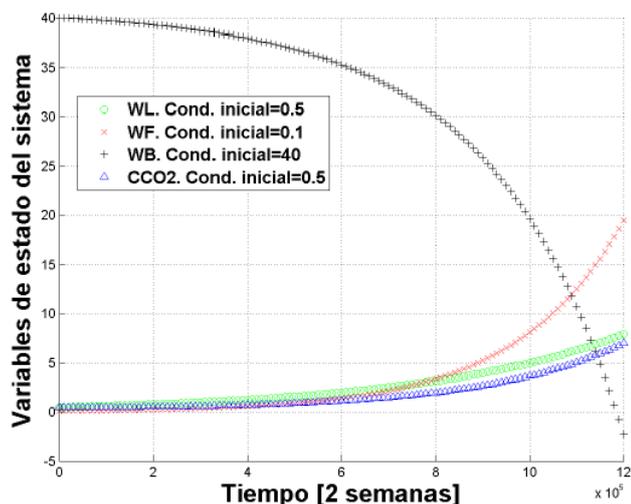


Figura 3. Comportamiento de la masa seca de los frutos, la masa seca de las hojas, los nutrientes y el flujo de dióxido de carbono durante dos semanas, con la entrada de control $u_{CO_2}^p$.

La Figura (4), muestra el comportamiento de la variable adjunta Ψ_4 , dicho comportamiento es importante, dado que la expresión del control depende en cada instante de tiempo de ella. De acuerdo con la expresión (21), el comportamiento en cada instante de tiempo de la variable de estado adjunta $\Psi_4(t)$ debe multiplicarse por el valor $(-\frac{1}{3}0,1554 \times 10^{-10})$, lo que proporciona el comportamiento del control.

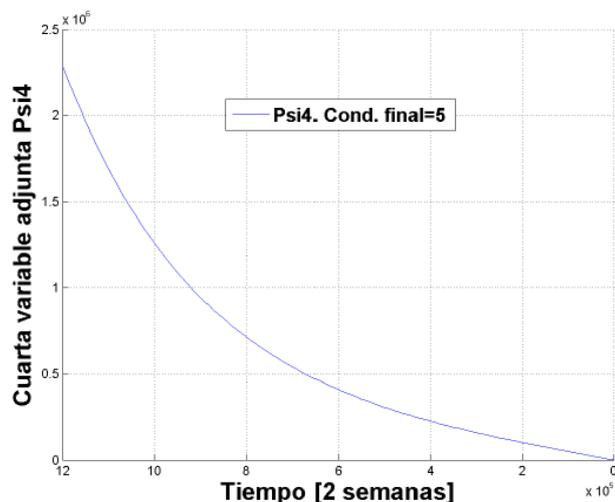


Figura 4. Comportamiento de la cuarta variable adjunta durante dos semanas.

7. CONCLUSIÓN

Se analizó el modelo del tomate de microclima y se obtuvo la ley de control sintetizada que proporciona beneficios para el agricultor, debido a que es posible obtener el mismo crecimiento en la masa seca de los frutos, pero con una disminución del flujo de dióxido de carbono. Un análisis de las matrices de peso en el indicador de desempeño, puede provocar que el crecimiento de la masa seca de los frutos sea más grande de lo que se muestra en este trabajo, sin embargo dicho planteamiento es un trabajo futuro. Por otra parte, fundamentado en este artículo, un trabajo que se vislumbra a corto plazo, es el diseño y construcción del dispositivo electrónico que regule el flujo del dióxido de carbono, así como su aplicación en un microclima.

REFERENCIAS

Aikman D. P., 1996. A procedure for optimizing carbon dioxide enrichment of a glasshouse tomato crop. *Journal of agricultural engineering research* 63, No. 2, 171–183.

Ioslovich I., Gutman P. and Linker R., 2009. Hamilton-Jacobi-Bellman formalism for optimal climate control of greenhouse crop. *Automatica*, 1227–1231.

Ioslovich I. and Seginer I., 1995. Normalized co-state variable for seasonal optimization of greenhouse tomato production. *Acta horticulturae* 417, 87–94.

Ioslovich I. and Seginer I., 1998. Approximate seasonal optimization of the greenhouse environment for a multi-state-variable tomato model. *Transactions of the ASAE* 41, No. 4, 1139–1149.

Md. Shahidul I., Toshiyuki M., Yuichi Y., 1996. Effect of carbon dioxide enrichment on physico-chemical and enzymatic changes in tomato fruits at various stages of maturity. *Scientia horticulturae* 65, 137–149.

Mortensen M. L., 1987. CO_2 enrichment in greenhouse. *Sci. Horticulturae* 33, 1–25.

Seginer I. and Ioslovich I., 1998. Seasonal optimization of the greenhouse environment for a simple two-stage crop growth model. *Journal of agricultural engineering research* 70, 145–155.

Tchamitchian M. and Ioslovich I., 1998. Equivalence of the temperature integral and the carbon dynamics concepts in plants: Utility for controll. *Acta horticulturae* 519, 171–180.

Van Straten G., Challa H. and Buwalda F., 2000. Towards user accepted optimal control of greenhouse climate. *Computers and electronics in agriculture* 26, No. 3, 221–238.

Van Straten G., van Willigenburg L. G., van Henten E. and van Ooteghem R., 2011. *Optimal control of greenhouse cultivation*. CRC. Press, United States of America.

Van Henten E. J., 1994. *Greenhouse climate management: An optimal control approach*. Doctorate dissertation. Agricultural University, Wageningen.

Challa H. and Schapendonk A. H. C. M., 1984. Dynamic optimization of CO_2 concentration in relation to climate control in greenhouses. In: *Carbon dioxide enrichment for greenhouse crops*. CRG Press, Boca Raton, FL, 147–160.

Nederhoff E.M., 1988. Dynamic optimization of the CO_2 concentration in greenhouses: an experiment with cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Acta horticulturae* 229, 341–348.