

Sistema Electrónico de Control para Regular la Concentración de CO₂ en un Micro Clima Fundamentado en el Modelo Dinámico del Cultivo de Jitomate

Edwin Alonso Monje* J. M. Gutiérrez Arias*
J. F. Reyes Cortés* I. Lopez Cruz**

* *Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (e-mail: alonso.201116878@gmail.com, jose.gutierrez@correo.buap.mx).*

** *Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma de Chapingo*

Resumen

En este trabajo se considera el modelo dinámico integrado por el cultivo de jitomate y de un microclima, tres variables relativas al cultivo y tres variables relativas al microclima ambas forman el sistema dinámico de seis variables de estado. El flujo de la concentración de CO₂ está considerado dentro de un término del modelo y este será elemento de control. Los objetivos son maximizar la producción y minimizar el consumo de energía. Por lo tanto, se plantea un problema de optimización, la solución se obtiene aplicando la teoría de control óptimo.

Se diseña e implementa un sistema de control electrónico, con el cual se regula la concentración de CO₂ al interior del microclima. Empleando el sensor K30 se obtiene la información real de la concentración de CO₂, dicha medición se compara con la señal de referencia obtenida de la solución del problema de optimización y de esta manera el sistema de control realiza el ajuste para mantener la concentración de CO₂ lo más cercano posible a la señal de referencia. Se implementaron los controles clásicos Proporcional, Proporcional Derivativo y Proporcional Integral Derivativo.

Keywords: Concentración de CO₂, Control Proporcional, Control Proporcional Derivativo, Control Proporcional Integral Derivativo, Cultivo de Jitomate.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se han realizados esfuerzos para utilizar el enriquecimiento de dióxido de carbono al interior de un invernadero, con el principal objetivo de optimizar la producción de los cultivos, Li et al. (2018).

Si bien se han hecho estudios relacionados con el enriquecimiento de CO₂ estos carecen de estrategias óptimas de control para el enriquecimiento de CO₂ basados en modelos dinámicos. Ya que estos solo se basan en estimaciones, análisis de energía termodinámica y experimentos, Rodríguez et al. (2015).

Las investigaciones relacionadas a modelos dinámicos son efectivas para identificar estrategias óptimas para aumentar el rendimiento (tasa fotosintética) mientras se reduce el consumo de CO₂. El modelo del sistema (invernadero) es bastante esquemático en varios aspectos debido a que se ignoran muchas propiedades físicas del sistema como intercambiadores de calor, algunos no trata la radiación terrestre y la evapotranspiración, y utiliza formulaciones

simples para describir los procesos dominantes como: la fotosíntesis, la transferencia de calor, la concentración de CO₂, entre otras, Thongbai et al. (2010).

Sin embargo, en la agricultura, el alto rendimiento de cosecha se obtiene mediante el uso de energía en un punto óptimo. Además, el uso equilibrado de energía en la agricultura reduce problemas ambientales de las actividades agrícolas. Por otro lado, el uso de la energía en la agricultura se divide en energía directa y energía indirecta. El uso de energía directa es a través del uso de combustible (derivados del petróleo u electricidad) y la energía indirecta es proporcionada por fertilizantes y productos químicos.

El modelo de TOMGRO fue desarrollado para responder al cambio dinámico de la temperatura, radiación solar y concentración de CO₂. El modelo de la planta de tomate involucra variables de estado que consisten en clases de edad fisiológicas de los componentes de las plantas, números de hojas, tallos y frutos, Jones et al. (1991).

Las principales variables a controlar al interior de un

invernadero son la temperatura, la humedad y la concentración de CO₂. Por esta razón los algoritmos contienen muchas reglas si-entonces, en parte combinadas con control proporcional simple. Con el tiempo, se agregaron otras funciones, como el control del riego, la energía, amortiguadores de calefacción y suministro de CO₂, Tap (2000). El dióxido de carbono se considera como un nutriente vegetal importante; uno que puede maximizar el crecimiento y el rendimiento del cultivo cuando se suministra de manera adecuada, la lógica detrás de esto es bastante simple. El material vegetal seco típicamente contiene aproximadamente 40% de carbono que se acumula en la planta durante su crecimiento a través del proceso de "fotosíntesis"; una reacción que en presencia de luz convierte agua y CO₂ en azúcares dentro de los tejidos de las hojas, Kuroyanagi et al. (2014). Por lo tanto, el carbono dentro de la planta se origina totalmente de CO₂. Muy a menudo la concentración ambiental de CO₂ se convierte en el factor limitante que controla la tasa de fotosíntesis reacción en espacios cerrados como invernaderos. En estudios anteriores se han demostrado que el enriquecimiento de CO₂ en invernaderos desde los niveles atmosféricos de aproximadamente 380 ppm a niveles tan altos como 800-1800 ppm pueden acelerar la planta crecimiento y aumentar el rendimiento de los cultivos en aproximadamente un 40%, Wittwer and Robb (1964). Dado el costo asociados con métodos comunes de enriquecimiento de CO₂ (por ejemplo, combustibles de hidrocarburos, que utilizan CO₂ comprimido en tanques) optimizando el nivel y la duración del enriquecimiento de CO₂ es una consideración importante en la agricultura de invernadero Van Straten et al. (2010). Obviamente, en términos de duración, el enriquecimiento solo es necesario durante el día (o cuando las luces están encendidas) ya que las plantas toman CO₂ cuando fotosintetizan, Seginer et al. (2017).

2. MODELO DEL INVERNADERO Y CULTIVO

El modelo del TOMGRO relaciona múltiples variables para un microclima y el cultivo, entre las variables que presenta se encuentran las de concentración de CO₂, humedad relativa, temperatura, etc. relacionadas con el microclima. Y la biomasa seca del dosel, biomasa seca de la raíz y número de nodos, etc. relacionadas con el cultivo. En éste trabajo se consideran las variables de estado relacionadas al microclima tales como: la concentración de CO₂ al interior del invernadero (C_i), la humedad relativa (V_i), la temperatura al interior del invernadero (T_g) y las variables de estado relativas al cultivo como: número de nodos (N), biomasa seca del dosel (W_c), biomasa seca de la raíz (W_r).

Las variables de control son la inyección de CO₂ (φ_{inj}) y el sistema de calefacción de la temperatura (Q_{calef}). Entonces definimos

$$x = [N \quad W_c \quad W_r \quad C_i \quad T_g \quad V_i]^T$$

$$u = [\varphi_{inj} \quad Q_{calef}]^T$$

2.1 Modelo del crecimiento del tomate

Número de Nodos: La tasa de desarrollo de nodos (planta desarrollada) se modela como una tasa máxima de aparición de nodos por día (N_m), multiplicado por una función que reduce el desarrollo vegetativo a temperaturas no óptimas sobre una base horaria durante cada día Jones et al. (1991).

$$\frac{d}{dt}N = N_m f_N(T_g) \quad (1)$$

donde:

Tabla 1. Descripción de Variables para los Nodos.

Símbolo	Descripción	Unidades
N	Número de nodos	
N_m	Número máximo de nodos por día	nodos d^{-1}
T_g	Temperatura al interior del invernadero	$^{\circ}C$
$f_N(T_g)$	Función que modifica el desarrollo del número de Nodos	$^{\circ}C$

Biomasa seca del dosel (W_c): La acumulación de biomasa para el modelo reducido es el resultado de la fotosíntesis, respiración y los procesos de conversión del tejido.

$$\frac{d}{dt}W_c = E(P_g - R_m(W_r + W_c))f_c \quad (2)$$

donde:

Tabla 2. Descripción de Variables para la biomasa seca del dosel y raíz.

Símbolo	Descripción	Unidades
W_c	Biomasa del dosel	g tejido $m^{-2}d^{-1}$
W_r	Biomasa de la raíz	g tejido $m^{-2}d^{-1}$
R_m	Velocidad de respiración de mantenimiento	(g CH ₂ O)/(g tejido d)
E	Eficiencia de conversión del tejido de la planta	(g tejido)/(g CH ₂ O)
P_g	Velocidad de la fotosíntesis brutal en el dosel	g tejido $m^{-2}d^{-1}$
f_c	Constante para todo nodo	Adimensional

Biomasa total de la raíz (W_r): La función que describe la biomasa total de la raíz es la siguiente:

$$\frac{d}{dt}W_r = E(P_g - R_m(W_r + W_c))(1 - f_c) \quad (3)$$

2.2 Modelo de invernadero

Concentración de CO₂ en el aire (C_i): La concentración de CO₂ en el aire en un invernadero esta descrita por la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{V_g}{A_g} \frac{d}{dt}C_i = G_v(C_o - C_i) + \varphi_{inj} + R - P_n \mu \quad (4)$$

Tabla 3. Descripción de Variables para la concentración de CO₂.

Símbolo	Descripción	Unidades
V_g	Volumen del invernadero	m^3
A_g	Área del invernadero	$m^2(gh)$
C_i	Concentración de CO ₂ al interior del invernadero	$Kg(CO_2)m^{-3}$
G_v	Función de la velocidad del viento al exterior	m/s
C_o	Concentración de CO ₂ al exterior del invernadero	$g m^3$
φ_{inj}	Flujo de inyección de CO ₂	$g s^{-1}m^{-2}$
R	Respiración del cultivo	$Kgs^{-1}m^{-2}$
P_n	Fotosíntesis del cultivo	$g s^{-1}m^{-2}$
μ	Fracción del peso molar de CO ₂ y CH ₂ O	$s m^{-1}$

Dentro de la literatura existen diversos modelos detallados disponibles para describir la fotosíntesis, un modelo simple se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_n = p_{n1} + p_{n2} \frac{I}{p_{n3} + I} \frac{C}{p_{n4} + C} + p_{n5}L \quad (5)$$

donde p_{n1} a p_{n5} son parámetros de regresión, I es el PAR incidente (radiación activa foto sintética), C es la concentración de CO₂ expresada en ppm y L es la LAI. Este modelo de fotosíntesis puede ser incorrecto para altas concentraciones de CO₂, debido a que las mediciones en las se basan no contienen altas concentraciones de CO₂. Además es solo válido para valores L mayores que 1. La conversión de C_i a C esta determinada por:

$$C = \frac{10^6 R_g}{M_{CO_2} P_{atm}} (T_g + T_0) C_i \quad (6)$$

donde R_g es la constante de los gases, M_{CO_2} es el peso molecular del CO₂ y T_0 es la temperatura absoluta cero.

Temperatura del aire (T_g): Para calcular la temperatura del aire al interior del invernadero se tiene la siguiente expresión:

$$C_g \frac{d}{dt} T_g = k_v(T_o - T_g) + Q_{calef} + k_r(T_o - T_g) + k_s(T_s - T_g) + G\eta \quad (7)$$

Tabla 4. Descripción de Variables para la temperatura.

Símbolo	Descripción	Unidades
T_o	Temperatura externa	$^{\circ}C$
T_g	Temperatura al interior del invernadero	$^{\circ}C$
T_s	Temperatura del suelo del invernadero	$^{\circ}C$
Q_{calef}	Entrada de calor	Wm^{-2}
G	Radiación de onda corta entrante	Wm^{-2}
C_g	Capacidad de calor del invernadero	$J^{\circ}C^{-1}m^{-2}$
k_v	Coefficiente de transferencia de calor por ventilación	$W^{\circ}Cm^{-2}$
k_r	Coefficiente de transferencia de calor en el techo	$W^{\circ}Cm^{-2}$
k_s	Coefficiente de transferencia de calor en el suelo	$W^{\circ}Cm^{-2}$
η	Factor de conversión de radiación	Adimensional

Humedad en el aire del invernadero (V_i): El vapor de agua contenido en el aire al interior del invernadero necesario para el cultivo se describe como una ecuación dinámica que está en función de la transpiración del cultivo.

$$\frac{d}{dt} V_i = \frac{A_g}{V_g} (E_t - G_v(V_i - V_o)) \quad (8)$$

Tabla 5. Descripción de Variables para la humedad relativa.

Símbolo	Descripción	Unidades
V_i	Humedad absoluta al interior del invernadero	$Kg m^3$
V_o	Humedad absoluta al exterior del invernadero	$Kg m^3$
E_t	Función de evo-traspiración	$^{\circ}C$

3. FORMULACIÓN GENERAL DEL PROBLEMA DE CONTROL ÓPTIMO

El control óptimo de cualquier sistema se fundamenta en tres conceptos: el modelo dinámico del sistema, una función y las restricciones del sistema. Consideremos la ecuación de estados en forma matricial:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \quad (9)$$

donde $\mathbf{x}(t)$ es el vector de estados, $\mathbf{u}(t)$ es la señal de control y t es el tiempo.

Se requiere de un criterio para evaluar el desempeño del sistema:

$$J = \phi(\mathbf{x}(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) dt \quad (10)$$

donde t_0 y t_f son el tiempo inicial y final, $\phi(\mathbf{x}(t_f), t_f)$ y $L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t)$ son funciones escalares, t_f puede ser fijo o libre. Empezando en el estado inicial $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$ y aplicando la señal de control $\mathbf{u}(t)$ 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 de control óptimo u optimización se basa en encontrar un control admisible $\mathbf{u}^*(t)$ el cual cause que el sistema (9) siga una trayectoria admisible $\mathbf{x}^*(t)$ que minimice el criterio de desempeño de la ecuación (10). Entonces, $\mathbf{u}^*(t)$ es llamado control óptimo y $\mathbf{x}^*(t)$ trayectoria optima.

Las restricciones (9) se agregan a la ecuación (10) con un vector de multiplicadores de Lagrange variante en el tiempo $\boldsymbol{\lambda}(t)$, por lo que resulta la siguiente expresión:

$$\bar{J} = \phi(\mathbf{x}(t_f)) + \int_{t_0}^{t_f} \{L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) + \boldsymbol{\lambda}^T(t) [f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) - \dot{\mathbf{x}}]\} dt \quad (11)$$

definiendo la función escalar Hamiltoniana como:

$$H(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\lambda}(t), t) = L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) + \boldsymbol{\lambda}^T(f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t)) \quad (12)$$

Integrando por partes el término $\boldsymbol{\lambda}^T(t)\dot{\mathbf{x}}$ se obtiene:

$$\bar{J} = \phi(\mathbf{x}(t_f)) - \boldsymbol{\lambda}^T(t_f)\mathbf{x}(t_f) + \boldsymbol{\lambda}^T(t_0)\mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^{t_f} [H(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\lambda}(t), t) + \dot{\boldsymbol{\lambda}}^T(t)\mathbf{x}(t)] dt$$

Considerando una variación infinitesimal en $\mathbf{u}(t)$, $\delta\mathbf{u}(t)$. Esta variación produce un cambio en la trayectoria de los estados $\delta\mathbf{x}(t)$ y una variación en el índice de desempeño δJ . Esta última variación puede ser calculada como sigue:

$$\delta\bar{J} = \left[\left(\frac{\partial\phi}{\partial\mathbf{x}} - \boldsymbol{\lambda}^T \right) \delta\mathbf{x} \right]_{t=t_f} + \left[\boldsymbol{\lambda}^T \delta\mathbf{x} \right]_{t=t_0} + \int_{t_0}^{t_f} \left[\left(\frac{\partial H}{\partial\mathbf{x}} + \boldsymbol{\lambda}^T \right) \delta\mathbf{x} + \frac{\partial H}{\partial\mathbf{u}} \delta\mathbf{u} \right] dt$$

Para evitar tener que determinar las funciones $\delta\mathbf{x}(t)$ producidas por $\delta\mathbf{u}(t)$ se eligen los multiplicadores de $\boldsymbol{\lambda}(t)$ de tal manera que los coeficientes de $\delta\mathbf{x}(t)$ y $\delta\mathbf{x}(t_f)$ en la ecuación anterior desaparezcan. Se elige entonces:

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}}^T = -\frac{\partial H}{\partial\mathbf{x}} \quad (13)$$

con las condiciones de frontera:

$$\boldsymbol{\lambda}^T(t_f) = \frac{\partial\phi}{\partial\mathbf{x}}(t_f) \quad (14)$$

Entonces $\delta\bar{J}$ se transforma en:

$$\delta\bar{J} = \boldsymbol{\lambda}^T(t_0)\delta\mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^{t_f} \frac{\partial H}{\partial\mathbf{u}} \delta\mathbf{u} dt \quad (15)$$

Si $\mathbf{x}(t_0)$ está especificada, entonces $\delta\mathbf{x}(t_0) = 0$.

Para una solución se requiere $\delta\bar{J} = 0$ para una variación arbitrario $\delta\mathbf{u}(t)$. Esto sucede solamente si

$$\frac{\partial H}{\partial\mathbf{u}} = 0 \quad (16)$$

en $t_0 \leq t \leq t_f$, está ecuación nos proporciona la ley de control.

4. DISEÑO DE LA LEY DE CONTROL

Si $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ son variables de estados del proceso en el tiempo t y $u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)$ son entradas de control al proceso en el tiempo t , entonces el sistema puede ser descrito por n ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \quad (17)$$

en nuestro caso:

$$\dot{x}_1 = N_m f_N(T_g) \quad (18)$$

$$\dot{x}_2 = E(P_g - R_m(W_r + W_c))f_c \quad (19)$$

$$\dot{x}_3 = E(P_g - R_m(W_r + W_c))(1 - f_c) \quad (20)$$

$$\dot{x}_4 = G_v(C_o - C_i) + \varphi_{inj} + R - P_n\mu \quad (21)$$

$$\dot{x}_5 = \frac{k_v}{C_g}(T_o - T_g) + Q_{calef} + k_r(T_o - T_g) + k_s(T_s - T_g) + G\eta \quad (22)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{A_g}{V_g}(E_t - G_v(V_i - V_o)) \quad (23)$$

$$(24)$$

Para nuestro sistema se desea maximizar el número de nodos, la biomasa seca del dosel y raíz. Y minimizar el

flujo de CO₂, la temperatura y la humedad al interior del invernadero. Por ello el índice de desempeño se encuentra descrito de la siguiente forma:

$$J = \frac{1}{2}[N^2(t_f) + W_r^2(t_f) + W_c^2(t_f) + C_i^2(t_f) + T_g^2(t_f) + V_i^2(t_f)] + \int_{t_0}^{t_f} \frac{1}{2}[-N^2(t) - W_r^2(t) - W_c^2(t) + C_i^2(t) + \varphi_{inj}^2(t) + T_g^2(t) + V_i^2(t)] dt$$

En éste caso con las ecuaciones descritas del modelo dinámico del cultivo y microclima se construye la siguiente ecuación Hamiltoniana.

$$H(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\lambda}(t), t) = \frac{1}{2}[-N^2(t) - W_r^2(t) - W_c^2(t) + C_i^2(t) + \varphi_{inj}^2(t) + T_g^2(t) + V_i^2(t)] + \lambda_1(t)f_1(t) + \lambda_2(t)f_2(t) + \lambda_3(t)f_3(t) + \lambda_4(t)f_4(t) + \lambda_5(t)f_5(t) + \lambda_6(t)f_6(t)$$

empleando la ecuación (13) se obtienen los siguientes co-estados:

$$\dot{\lambda}_1 = N + \lambda_2 \frac{\partial\dot{W}_c}{\partial N} + \lambda_3 \frac{\partial\dot{W}_r}{\partial N} + \lambda_4 \frac{\partial\dot{C}_i}{\partial N} + \lambda_6 \frac{\partial\dot{V}_i}{\partial N} \quad (25)$$

$$\dot{\lambda}_2 = W_c + \lambda_2 \frac{\partial\dot{W}_c}{\partial W_c} + \lambda_3 \frac{\partial\dot{W}_r}{\partial W_c} \quad (26)$$

$$\dot{\lambda}_3 = W_r + \lambda_2 \frac{\partial\dot{W}_c}{\partial W_r} + \lambda_3 \frac{\partial\dot{W}_r}{\partial W_r} \quad (27)$$

$$\dot{\lambda}_4 = -C_i + \lambda_2 \frac{\partial\dot{W}_c}{\partial C_i} + \lambda_3 \frac{\partial\dot{W}_r}{\partial C_i} + \lambda_4 \frac{\partial\dot{C}_i}{\partial C_i} \quad (28)$$

$$\dot{\lambda}_5 = -T_g + \lambda_1 \frac{\partial\dot{N}}{\partial T_g} + \lambda_2 \frac{\partial\dot{W}_c}{\partial T_g} + \lambda_3 \frac{\partial\dot{W}_r}{\partial T_g} + \lambda_4 \frac{\partial\dot{C}_i}{\partial T_g} + \lambda_5 \frac{\partial\dot{T}_g}{\partial T_g} + \lambda_6 \frac{\partial\dot{V}_i}{\partial T_g} \quad (29)$$

$$\dot{\lambda}_6 = -V_i + \lambda_6 \frac{\partial\dot{V}_i}{\partial V_i} \quad (30)$$

de la ecuación (16) se obtiene

$$\frac{\partial H}{\partial\mathbf{u}} = \varphi_{inj} + \lambda_4 = 0$$

$$\varphi_{inj} = -\lambda_4$$

por lo tanto la ecuación (4) queda.

$$\frac{V_g}{A_g} \frac{d}{dt} C_i = G_v(C_o - C_i) - \lambda_4 + R - P_n\mu \quad (31)$$

Entonces para determinar el control $\mathbf{u}(t)$, se deben resolver las ecuaciones diferenciales de los estados y los co-estados del sistema dinámico.

5. SIMULACIÓN

En las siguientes Fig. 1-2 se muestran los resultados obtenidos de la simulación de los estados y co-estados del sistema dinámico, bajo la ley control óptima. Los cuales fueron resueltos con ode45 en **MATLAB**

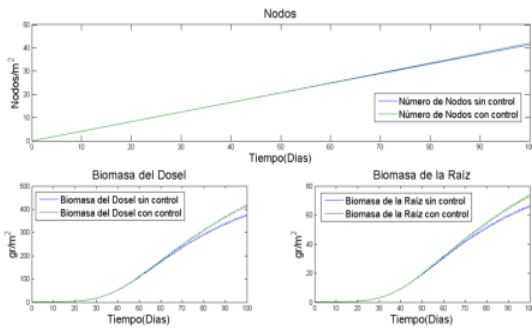


Figura 1. Variables relacionadas al cultivo.

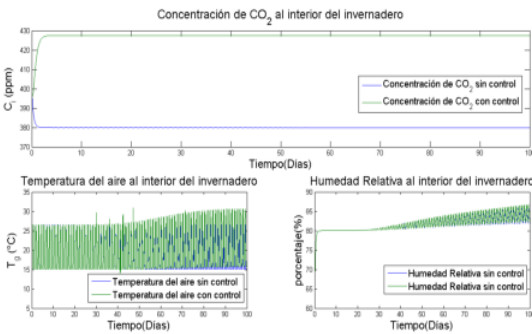


Figura 2. Variables relacionadas al invernadero.

De la Fig. 1 se puede observar que existe una ganancia de un nodo, así como en la biomasa del dosel (41 gr/m^2) y raíz (7 gr/m^2), las cuales representan un 11% de ganancia, los resultados son representados por metro cuadrado. En la Fig. 2 se observa que la concentración de CO_2 aumenta a 427 ppm, la temperatura aumenta hacia los 30°C y la humedad también varía con la ley de control propuesta. Observando que el planteamiento es correcto y se obtienen ganancias se diseña un sistema de control electrónico.

6. DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

Para el diseño del sistema electrónico control para regular la concentración de dióxido de carbono al interior del invernadero, se emplean diversos dispositivos entre los que se encuentran un sensor medidor de dióxido, una válvula proporcional, una tarjeta electrónica Arduino Due. A continuación se describirán a detalle los dispositivos empleados.

Sensor de Dióxido de Carbono (CO_2): El sensor K-30 (Fig. 3) es un sensor el cual mide la concentración de CO_2 , dicho sensor es de bajo costo y de bajo consumo de potencia.



Figura 3. Sensor de CO_2 K-30.

Tarjeta Arduino Due: En esta tarjeta se implementarán los algoritmos de control P, PD y PID, la ventaja de esta tarjeta es que integra salidas analógicas (DAC) con una resolución de hasta 12 bits a 3.3 V. Con esta tarjeta se obtiene la lectura actual del sensor, y también se obtienen las salidas PWM para el actuador. Una desventaja es que la tarjeta sólo funciona a 3.3 V en sus salidas aproximadamente y la que se requiere para la unidad es de 0 a 10 V por lo tanto, se implementa un circuito para acoplar la señal.



Figura 4. Tarjeta Arduino Due

Control de Flujo de CO_2 : Para controlar el flujo de CO_2 se cuenta con una válvula proporcional marca ASCO Fig. 5(b), la cual cuenta con un controlador proporcional Fig. 5(a), constituido por un amplificador electrónico para modificar y amplificar la señal de entrada a una tensión de salida modulante para el control continuo de la solenoide ASCO series 8202 y 8203, para dicho funcionamiento requiere una señal por ancho de pulso (PWM) de 0 Vcc a 10 Vcc a una frecuencia de 300 Hz para aire o gas.



(a) Unidad (b) Electro válvula

Figura 5. (a) Unidad de control para solenoide ASCO, (b) Electro Válvula

6.1 Pruebas Físicas

En la implementación del sistema de control (Fig. 6), se consideran algunos algoritmos de control tales como: Proporcional

$$u(t_k) = k_p \tilde{e}(t_k) \quad (32)$$

Proporcional Derivativo

$$u(t_k) = k_p \tilde{e}(t_k) + k_v \text{euler}(t_k) \quad (33)$$

donde : $\text{euler}(t_k) = \frac{T(t_k) - T(t_{k-1})}{h}$

Proporcional Integral Derivativo

$$u(t_k) = k_p \tilde{e}(t_k) + k_i \text{Int}(t_k) + k_v \text{euler}(t_k) \quad (34)$$

donde : $\text{Int}(t_k) = \text{Int}(t_{k-1}) + h\tilde{e}(t_k)$

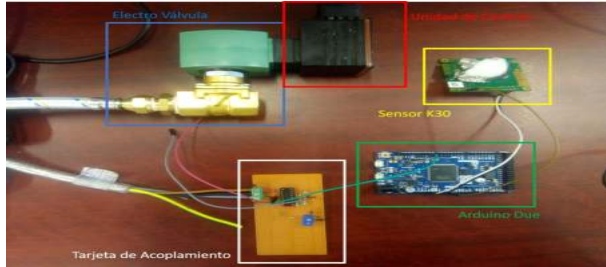


Figura 6. Sistema Electrónico.

las pruebas físicas se realizaron al interior de un invernadero de 8 x 4 m, en el cual existen variaciones de volumen de aire debido a que existen corrientes de aire presentes todo en tiempo. Esto ocasiona que las lecturas del sensor varíen y la señal de control generada cambie de acuerdo a cada algoritmo propuesto.

En la Fig. 7 se observa que tanto el control P y PD presentan bastante ruido, dicho ruido afecta el funcionamiento de la electro válvula debido a que su respuesta con ese tiempo genera vibraciones y calentamiento en la bobina. En el caso del controlador PID no presenta dicho ruido por lo que el funcionamiento de la electro válvula es adecuado ya que no presenta vibraciones y calentamiento, así se evita el deterioro de la misma.

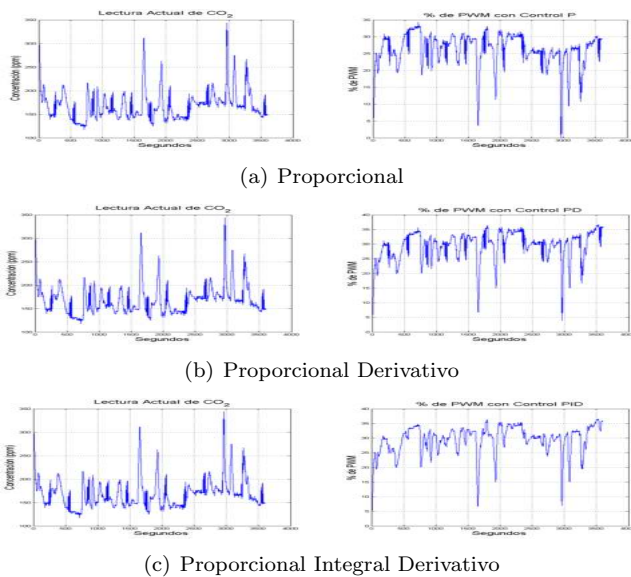


Figura 7. (a) Comportamiento de Control Proporcional, (b) Comportamiento de Control Proporcional Derivativo, (c) Comportamiento de Control Proporcional Integral Derivativo

7. CONCLUSIÓN

Como se observa en la Fig. 7, el que mejor comportamiento presenta es el control PID en un lapso de tiempo de una hora, debido a que la lectura del sensor cambia constantemente éste responde más rápido y con mayor precisión, y evita que existan vibraciones en la solenioide y se reduce el calentamiento.

También se puede observar que la lectura al interior del invernadero siempre esta por debajo de la concentración deseada por lo que la electro válvula mayormente se encuentra abierta y no presenta una reducción en el consumo de energía. Por ello se propone utilizar un generador CO₂, el cual lo genere a base de quema de gas natural o LP.

Para que el sistema llegue a la trayectoria deseada se pretende realizar un pre llenado de CO₂ y así poder visualizar que el sistema funciona correctamente.

REFERENCIAS

- Jones, J.W., Dayan, E., Allen, L., Van Keulen, H., and Challa, H. (1991). A dynamic tomato growth and yield model (tomgro). *Transactions of the ASAE*, 34(2), 663–672.
- Kuroyanagi, T., Yasuba, K.i., Higashide, T., Iwasaki, Y., and Takaichi, M. (2014). Efficiency of carbon dioxide enrichment in an unventilated greenhouse. *Biosystems engineering*, 119, 58–68.
- Li, Y., Ding, Y., Li, D., and Miao, Z. (2018). Automatic carbon dioxide enrichment strategies in the greenhouse: A review. *Biosystems engineering*, 171, 101–119.
- Rodríguez, F., Berenguel, M., Guzmán, J.L., and Ramírez-Arias, A. (2015). *Modeling and control of greenhouse crop growth*. Springer.
- Seginer, I., van Straten, G., and van Beveren, P.J. (2017). Day-to-night heat storage in greenhouses: 1 optimisation for periodic weather. *Biosystems Engineering*, 161, 174–187.
- Tap, F. (2000). *Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production*. sn].
- Thongbai, P., Kozai, T., and Ohshima, K. (2010). CO₂ and air circulation effects on photosynthesis and transpiration of tomato seedlings. *Scientia Horticulturae*, 126(3), 338–344.
- Van Straten, G., van Willigenburg, G., van Henten, E., and van Ooteghem, R. (2010). *Optimal control of greenhouse cultivation*. CRC press.
- Wittwer, S. and Robb, W. (1964). Carbon dioxide enrichment of greenhouse atmospheres for food crop production. *Economic Botany*, 18(1), 34–56.