Implementación de un sistema de control de variables físicas en un invernadero escala laboratorio

Implementation of a physical variable control system in a laboratory-scale greenhouse

Marco A. Beltrán, Johan A. Soto, Cesar Gerardo Parra, Julio C. Picos, Luis E. Barreto*

Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán, División de estudios de posgrado e investigación. *Autor de correspondencia: luis.bs@culiacan.tecnm.mx

Resumen

Ante los desafíos que se presentan en la actualidad como son escasez de agua y climas poco favorables para el desarrollo de las plantas, en esta investigación se realiza la implementación de sistemas de control del tipo PID y ON-OFF en un invernadero escala laboratorio para producción de alimentos. Se logra reducir la temperatura máxima en por lo menos 10 °C y se aumenta la humedad relativa en un 10 % aproximadamente en un intervalo de 6 horas durante los periodos de mayor insolación. Además, se realiza un análisis del comportamiento del sistema de riego, en donde se obtuvo un valor promedio del 81.7 % con un error del 1.7 % con respecto al valor deseado.

Palabras clave: *Control, PID, On-Off, Invernadero.*

Abstract

Facing the current challenges, such as water scarcity and unfavorable climatic conditions for plant development, this research implements PID and ON-OFF control systems in a laboratory-scale greenhouse for food production. It has been achieved to reduce the maximum temperature by at least 10 °C and to increase the relative humidity by about 10 % in a 6-hour interval during the periods of highest insulation. In addition, the performance of the irrigation system has been analyzed, obtaining an average value of 81.7 % with an error of 1.7 % with respect to the desired value.

Keywords: *Control, PID, On-Off, Greenhouse.*

Recibido: 12/07/2025; Aceptado 04/08/2025; Publicado 25/08/2025

Introducción

Las condiciones ambientales en el estado de Sinaloa se ven afectadas por altas temperaturas y alta humedad. En los últimos años el recurso hídrico se ha visto limitado, por lo tanto, crear un microclima artificial controlado favorece el crecimiento de los cultivos. Los microclimas artificiales controlados son sistemas que se encuentran aislados del medio ambiente que los rodea con el objetivo de mejorar la calidad de los cultivos [1]. En estos sistemas interactúan variables físicas que pueden ser controladas, como la temperatura, humedad de ambiente y humedad en el suelo [2].

El control de humedad de suelo para el riego en la producción de alimentos es una de las funciones más importantes dentro de un invernadero, sin embargo, esta puede ser afectada por otras variables como la temperatura y humedad del ambiente [3]. Los sistemas de control son una herramienta útil para manipular las variables físicas dentro de un microclima artificial. Para esto, existen métodos de control como el ON-OFF con histéresis y el proporcional-integral-derivativo (PID) [4]. Estos se pueden implementar por medio de un Controlador Lógico Programable (PLC), el cual permite realizar aplicaciones de tipo industrial con control de variables [5].

Existen investigaciones relacionadas con los sistemas de control de riego como se muestra en [6], donde se menciona que el riego agrícola adquiere mayor relevancia cuando su programación es la correcta, pasar de un riego manual, como el método de inundación, a uno por control de lazo cerrado, puede ahorrar agua hasta un 50 %. [7] En este otro, se menciona la implementación de riegos con control de lazo cerrado pudiendo alcanzar hasta un 73% de ahorro.

En [8] se muestran distintos sistemas de enfriamiento como lo son la ventilación, enfriamiento por evaporación y enfriamiento por desecación y distintos sistemas de control de humidificación, como son la humidificación mediante la adición de agua por microgotas y el método de deshumidificación por bombeo de aire caliente.

Por otra parte, en [9] se presenta la simulación de un controlador PID en un invernadero inteligente con MATLAB Simulink, donde se obtiene un comportamiento oscilatorio en temperatura y humedad. En [10] se diseña un sistema de control por redes neuronales para temperatura y humedad en un invernadero en invierno.

En este trabajo se diseña e implementa un sistema de control para las variables de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo. En el punto II de este trabajo se describe la planta de pruebas del invernadero. En el punto III se presenta la implementación de los sistemas de control de variables. En el punto IV los resultados y discusión del análisis del comportamiento de las variables y en el punto V las conclusiones de la investigación.

Fundamentación Teórica

PLANTA DE PRUEBAS

Las dimensiones del invernadero escala laboratorio de tipo micro túnel son: 2 metros de ancho, 3 metros de largo, 3 metros de alto y con un techo de forma cilíndrica de un metro de radio. La estructura del invernadero está construida con perfil tubular cuadrado de acero galvanizado. Para cubrir la estructura base se utilizó un plástico de polietileno color lechoso con un porcentaje de sombra de 25 % (Figura 1). En el interior se colocaron 9 contenedores con 60 L de sustrato orgánico para hortalizas. Los componentes eléctricos y electrónicos del invernadero se dividen en tres sistemas para controlar las variables de temperatura interna, humedad relativa interna y humedad de suelo.

Figura 1. *Invernadero hidropónico escala laboratorio.*

A. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES

1. Sistema de humedad.

El sistema de humidificación se encarga de aumentar la humedad interna dentro del invernadero. Está compuesto por dos actuadores: un humidificador ultrasónico, el cual se encuentra en el interior de un tanque de agua para generar vapor y un ventilador que extrae el vapor generado dentro del tanque de agua, a través una tubería para introducirlo al interior del invernadero, como se muestra en la Figura 2.

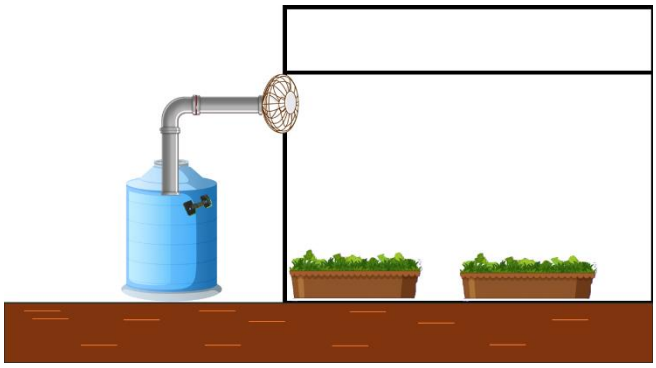

Figura 2. *Sistema de humidificación.*

2. Sistema de temperatura.

El sistema de temperatura tiene el objetivo de modificar la temperatura interna del invernadero en dos sentidos: enfriamiento y calentamiento. La modificación de la temperatura interna del invernadero depende de un intercambiador de calor de flujo cruzado no mezclado que se encuentra en el interior del invernadero. Este intercambiador de calor está conformado por un par de ventiladores que generan un flujo de aire que circula a través de un radiador. Dentro del radiador se tiene un flujo agua fría o caliente para enfriar o calentar el sistema, en donde cada una de estas provienen de dos sistemas de almacenamiento diferentes. Ambos tanques de agua se encuentran ubicados fuera del invernadero, en donde el agua es transportada por tuberías que se encuentran por debajo del suelo. El tanque de calentamiento se encuentra a la salida del radiador, después se tiene un calentador solar para calentar el agua. Para circular el agua de los subsistemas se utilizan motobombas. Al final de cada subsistema se encuentran instaladas dos válvulas que evitan que el agua de estos se mezcle y de igual forma un par de válvulas después del radiador, las cuales permiten que el agua regrese al subsistema correcto como se observa en la Figura 3.

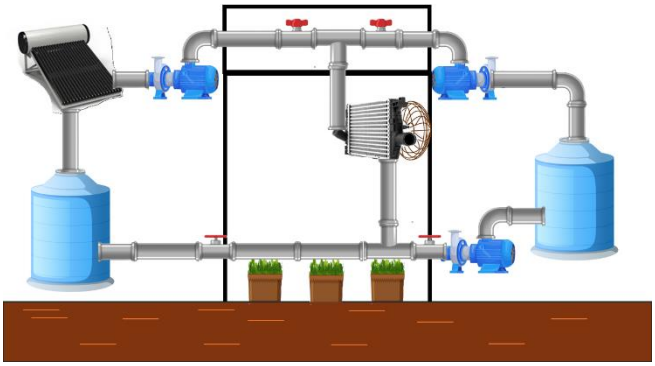

Figura 3. *Sistema de temperatura.*

3. Sistema de riego

La finalidad del sistema de riego es mantener la humedad del suelo adecuada para el desarrollo del cultivo en el interior del invernadero. En la Figura 4 se muestra que el sistema de riego se compone de un tanque de almacenamiento de agua, dos actuadores: una electroválvula y una bomba, un sensor de humedad de suelo y un sistema de micro mangueras y goteros que distribuyen el agua en las nueve macetas utilizadas. Se colocó el sensor de humedad en la maceta más lejana a la salida de la bomba como en la Figura 4 (a) para que el agua residual de la micro manguera fuera captada por el sensor.

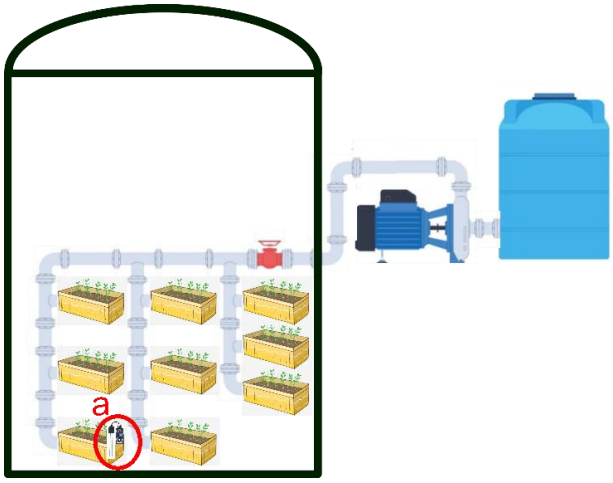

Figura 4. *Sistema de riego.*

Figura 5. *Gabinete eléctrico.*

B. COMPONENTES DEL SISTEMA

El sistema eléctrico está compuesto por una variedad de componentes que se observan en la Figura 5 y se enlistan en la Tabla 1. En el punto (a) del gabinete electrónico se encuentran los componentes de control y en el punto (b) los de potencia, mientras que en el exterior del gabinete tanto dentro como fuera del invernadero se ubican los sensores y actuadores del sistema.

Tabla 1. *Componentes eléctricos.*

Cantidad	Componente	Descripción
1	AS228T-A	PLC de la marca *Delta electronics.*
3	Electroválvulas 12v	Actuades en sistemas de riego y temperatura, protección antirretorno.
1	THD-DD2-C	Sensor de humedad relativa ambiental y temperatura.
1	Transmisor 4-20mA	Conversión de señal resistiva a señal de corriente.
1	HD-38	Sensor de humedad de suelo resistivo.
1	RTD PT100	Sensor para temperatura externa.
3	Ventiladores 12v	Actuadores principales en los sistemas de humedad y temperatura.
1	Humidificador ultrasónico	Actuador que genera la humedad que se introduce al invernadero.
4	BA-1208HD	Bombas para sistemas de riego y temperatura.

IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL

A. CONTROL DE TEMPERATURA

La temperatura es una de las variables físicas a controlar en el invernadero. Para controlar esta variable se realiza el análisis del sistema en lazo cerrado en la Figura 6. El controlador que se utiliza es el PLC AS228T-A de la marca *Delta electronics*, el actuador del sistema es un intercambiador de calor de flujo cruzado no mezclado y el sensor es el THD-DD2-C para el monitoreo de la temperatura como retroalimentación del sistema. Para la implementación del control de temperatura se utiliza el algoritmo PID, Ecs. (1) [11].

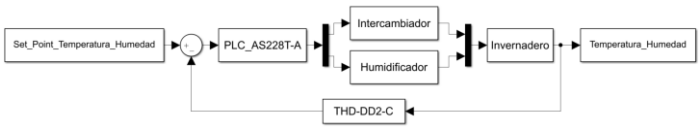

Figura 6. *Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura y humedad.*

$$M = K_p \cdot \left(e + \frac{1}{T_i}\int e\,dt + T_d\frac{de}{dt}\right) \qquad (1)$$

En donde:

M= Salida del controlador.
K_p= Ganancia proporcional.
e= Error
T_i= Tiempo integrativo
T_d= Tiempo derivativo

Se definen las ganancias para el funcionamiento del control PID, este algoritmo utiliza la temperatura leída y escalada para calcular una salida que compense el error existente, además, al mismo tiempo con dicha salida se genera un pulso PWM con el cual se varia la velocidad

de los ventiladores del intercambiador de calor. La lógica del funcionamiento del sistema de control de temperatura se muestra en la Figura 7. La sintonización de las ganancias del controlador PID del enfriamiento, calentamiento y humidificación se realiza con los siguientes pasos [12]:

1. Ajuste de K_p (Ganancia Proporcional)
   - Realizar 4 pruebas con K_p = 5, 10, 20, 40 (K_i = 0, K_d = 0).
   - Seleccionar el valor de K_p que permita a la variable llegar al *Set Point* rápido, con el menor sobre impulso.
2. Ajuste de K_i (Ganancia Integral)
   - Fijar K_p al valor definido del paso 1.
   - Realizar 4 pruebas con K_i = 1, 2, 4, 8 (K_d = 0).
   - Elegir el K_i que minimice el error en estado estacionario sin degradar la estabilidad.
3. Ajuste de K_d (Ganancia Derivativa)
   - Fijar K_p y K_i a los valores definidos en los pasos 1 y 2.
   - Realizar 4 pruebas con K_d = 0.01, 0.05, 0.1, 0.2.
   - Seleccionar el K_d que reduzca oscilaciones y mejore el amortiguamiento.

Dicha sintonización se realiza conforme a la guía de usuario del PLC [13] donde se indica una sintonización manual bajo los parámetros que se consideran en los pasos anteriores.

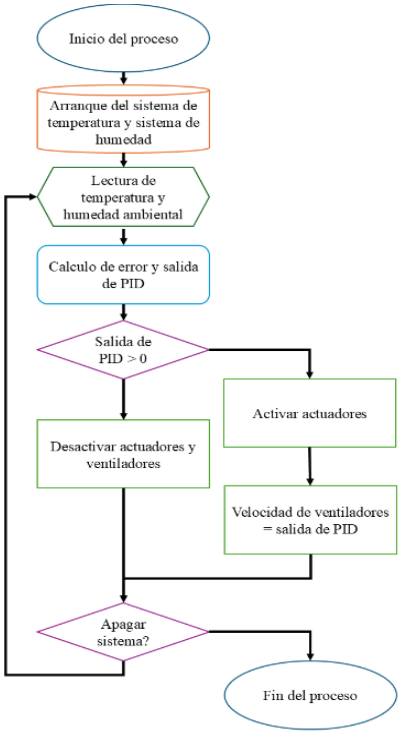

Figura 7. *Diagrama de flujo del sistema de temperatura y humedad.*

B. CONTROL DE HUMEDAD

El sistema de control de humedad también tiene una estructura de un sistema en lazo cerrado como se observa en la Figura 6. Se implementa el control en el mismo PLC que lleva a cabo los cálculos relacionados al error y la salida, donde se utiliza como actuador un humidificador ultrasónico. Como retroalimentación al sistema de control de humedad se utiliza el sensor THD-DD2-C. Para este se realiza un control continuo con base al algoritmo PID de la Ec. (1).

El código del sistema de humidificación requiere que se defina un valor deseado para comenzar a funcionar. Con el sistema encendido solo es necesario configurar las ganancias del controlador PID para que este empiece a trabajar. La lectura del sensor de humedad THD-DD2-C se lleva a cabo de forma automática desde el módulo de expansión del PLC para ser enviada a un registro y posteriormente ser escalada a valores interpretables por el algoritmo de control. Cuando la salida del algoritmo PID es mayor a 0 los actuadores del sistema se activan y la velocidad del ventilador varia en base a la salida del PID calculado. La sintonización del control PID del sistema de humidificación siguió la misma metodología utilizada para subsistema de enfriamiento y calentamiento.

C. CONTROL DE RIEGO

El control de riego se basa en un sistema de control en lazo cerrado. Se inicia al establecer el *Set Point* (valor deseado). Se implementa el control en el mismo PLC, que envía la señal de activación a los actuadores, en este caso una bomba centrifuga monofásica. Debido a que la humedad ambiente del invernadero afecta el control de la variable de humedad del suelo, se genera una perturbación que entra en una sumatoria como se muestra en la Figura 8. El sensor HD-38 mide la humedad del suelo y entra en una retroalimentación con el *Set Point*. A la salida tenemos la variable controlada, que es la humedad del suelo.

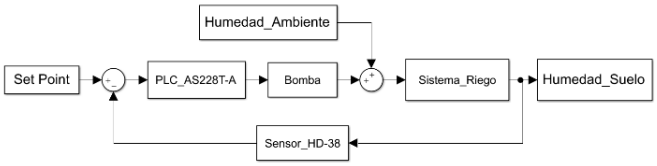

Figura 8. *Diagrama de bloques del sistema de humedad de suelo.*

Además, se implementa un algoritmo de control *on-off* en donde se desarrolla la lógica de funcionamiento como se observa en el diagrama de flujo de la Figura 9 *[14]*. Al iniciar el proceso se requiere seleccionar un *Set Point*, se toma la lectura del sensor y se comprueba si esta es menor al 60 %. Esto se hace con el fin de tener un riego de emergencia

por baja humedad provocado por un paro prolongado del riego. A continuación, se seleccionan las histéresis superior e inferior: +7 y -2 respectivamente, y se hacen dos comprobaciones, una compara el valor actual con el límite superior establecido y la otra con el límite inferior. En caso de ser igual o menor al límite inferior, se activa el sistema de riego y en caso de ser mayor o igual al límite superior se detiene el sistema.

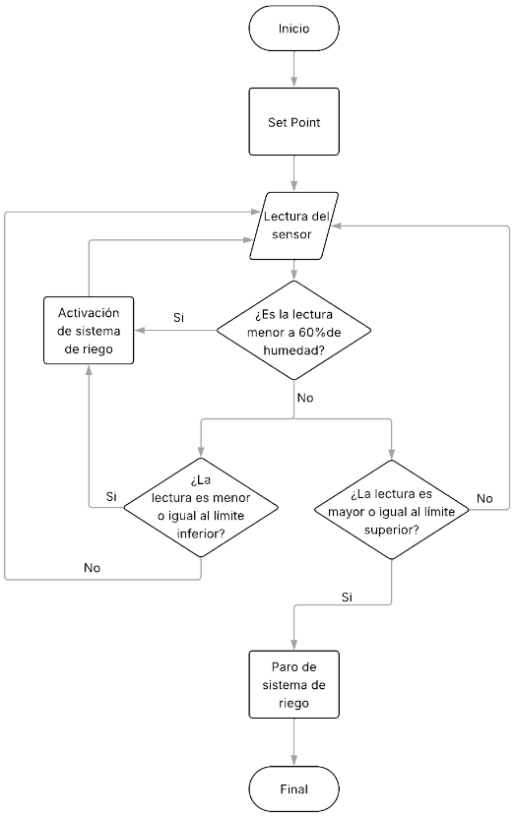

Figura 9. *Diagrama de flujo del sistema de humedad de suelo.*

Resultados

A. Control PID de temperatura y humedad

Uno de los patrones que se observan al analizar las gráficas de comportamiento de la temperatura interna del invernadero son los aumentos y disminuciones de temperatura de forma natural a lo largo del día, al tener una temperatura menor a 30 °C desde las 15:00 hasta las 21:00 horas y un aumento hasta más de 60 °C desde las 9:00 hasta las 15:00 horas en el interior del invernadero escala laboratorio. En el análisis de la humedad relativa se encontraron periodos de disminución y aumento de forma natural. Estas mediciones se realizan de manera simultánea a las de temperatura, en este caso aumentan durante la noche y disminuyen durante el día (Figura 10).

El valor deseado de temperatura es de 50 °C, el control de temperatura se lleva a cabo entre 10:00 y 14:00 horas cuando la temperatura se encuentra en un punto lo suficiente alto para que el sistema logre mantener un valor constante y en un periodo de tiempo considerable. En términos generales se puede observar en la Figura 10 (a), cómo el sistema oscila entre valores de 49 °C y 51 °C durante las horas más calientes del día. De igual forma se observa en la Figura 10 (b), que en el lapso de 9:00 hasta las 15:00 horas se activaba el control de humedad ambiental donde los valores se mantienen entre 20 % y 25 % de humedad relativa.

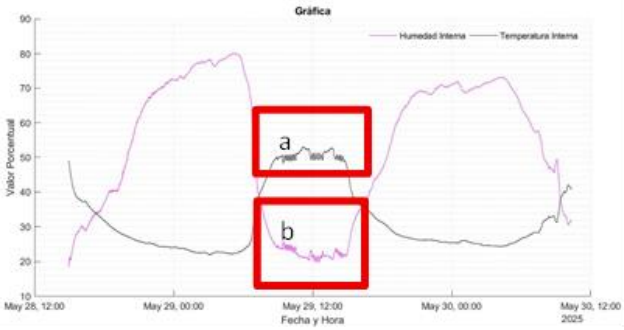

Figura 10. *Gráfica de temperatura y humedad interna.*

B. Control On-Off de Humedad del Suelo

El comportamiento de humedad del suelo durante las primeras 24 horas se observa en la Figura 11. La lectura inicial de humedad del suelo es del 18 %, lo cual corresponde a un sustrato seco Figura 11 (a), el primer sobre impulso que se muestra en la Figura 11 (b) ocurre debido a la tensión superficial del agua, al entrar en contacto con el sustrato seco. Al romperse la tensión superficial, el agua humedece el sustrato conforme se drena y al encontrarse húmedo, el sobre impulso se ve disminuido en posteriores riegos Figura 11 (c). Se observa también que la activación del riego Figura 11 (d) sucede según lo programado en el algoritmo de control.

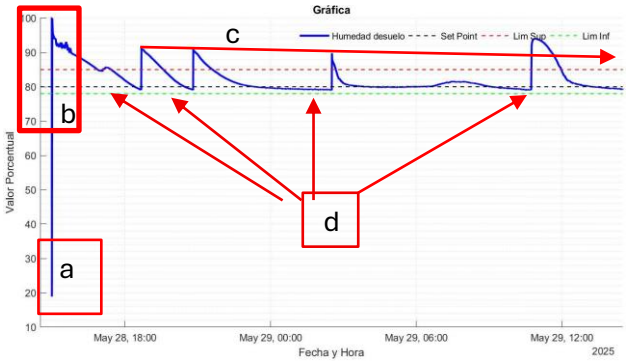

Figura 11. *Gráfica de las primeras 24 horas de riego.*

El comportamiento de la humedad de suelo durante 48 horas se muestra en la Figura 12. El patrón descendente en el sobre impulso de las activaciones de riego de la Figura 12 (a) se mantiene, lo que indica que el sustrato tiene un nivel de humedad homogéneo en la maceta y esto hace que la duración del riego sea menor, excepto en el punto de la Figura 12 (b). Se pueden observar ventanas de tiempo en la Figura 12 (c) donde la humedad desciende lentamente. Durante estas 48 horas se obtienen las mediciones promedio de la Tabla 2.

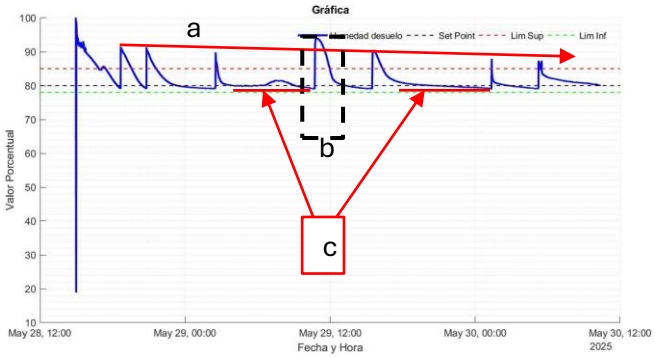

Figura 12. *Gráfica de 48 horas de humedad de suelo.*

Tabla 2. *Humedad promedio diaria.*

Día	% Humedad de suelo promedio
28 de mayo de 2025	84.67%
29 de mayo de 2025	81.09%
30 de mayo de 2025	80.64%

La disminución en la cantidad de veces que se riega durante los periodos de tiempo Figura 13 (a), corresponde con mediciones altas de humedad ambiental dentro del invernadero, por lo que se asume un nivel de drenado/evaporación alrededor de 50 % más bajo. Por otra parte, se observa el comportamiento normal de drenado/secado del sustrato en Figura 13 (c), sin embargo, en la Figura 13 (b) se observa una retención de humedad del 91 % por más tiempo.

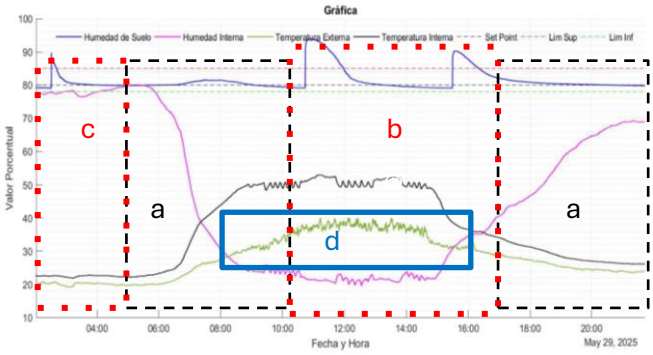

Figura 13. *Gráfica de variaciones de humedad de suelo.*

Estas crestas suceden durante un periodo de variación climática muy elevada (Figura 13 (d)) debido a la presencia de nubosidad y viento, por lo que se presenta una alta demanda energética de los actuadores del invernadero (Figura 13(b)) que puede afectar la lectura de los sensores.

Comparado con [6], el trabajar dentro de un invernadero de escala laboratorio, permitió que la humedad exterior no afectara de manera tan agresiva el nivel de humedad del sustrato, aunque, en ambos casos, fallas energéticas se hicieron presentes. Por otra parte, el riego por goteo permite canalizar el agua de riego directo al área de las raíces a comparación de [7] que utiliza el método de inundación de canales.

El método de control de temperatura que se utiliza en este invernadero escala laboratorio es de flujo cruzado no mezclado y el de humidificación, es la introducción de microgotas generadas por ultrasonido, lo que difiere de los métodos de control de variables descritos en [8], donde hay contacto directo de humedad y temperatura y comparado con la investigación [10], la implementación se hizo en un clima de altas temperaturas.

Conclusiones

En este trabajo se cumple con el objetivo de implementar un sistema de control en un invernadero escala laboratorio regulando las variables de: temperatura, humedad relativa y humedad del suelo. Los resultados indican que la temperatura y humedad relativa se mantienen estables en un rango de 50 °C y 20 %, respectivamente, durante el intervalo de tiempo 9:00 a 15:00 horas. La humedad de suelo se mantiene en un valor superior al 78 % y se observa que el sobre impulso del 95 % que se obtiene en el primer riego, disminuye para acercarse a la histéresis propuesta. Además, se identifica cómo la humedad interna alta hace más lenta la evaporación y se reduce la frecuencia de riego.

Referencias

[1] D. Ma, N. Carpenter, H. Maki y T. U. Rehman, «Greenhouse environment modeling and simulation for microclimate control,» *Computers and Electronics in Agriculture,* vol. 162, pp. 134-142, 2019.

[2] A. Bhujel, J. K. Basak, F. Khan, E. Arulmozhi, M. Jaihuni, T. Sihalath, D. Lee, J. Park y H. T. Kim, «Sensor Systems for Greenhouse Microclimate Monitoring and Control: a Review,» *Journal of Biosystems Engineering,* vol. 45, pp. 341-361, 2020.

[3] N. Georgios, N. Damianos, K. Nikolaos y K. Constantinos, «Irrigation of Greenhouse Crops,» *Horticulturae,* vol. 5, p. 7, Enero 2019.

[4] R. P. Borase, D. K. Maghade, S. Y. Sondkar y S. N. Pawar, «A review of PID control, tuning methods and applications,» *International Journal of Dynamics and Control,* 2020.

[5] G. B. Cáceres, A. Ferramosca, P. Millán Gata y M. Pereira Martín, «Model Predictive Control Structures for Periodic ON-OFF Irrigation,» *IEEE Access,* p. 1, 2023.

[6] C. Schugurensky y F. Capraro, «Control automático de riego agrícola con sensores capacitivos de humedad de suelo. Aplicaciones en vid y olivo».

[7] R. Muñoz Carpena, B. H., W. Klassen, T. Dispenza y M. D. Dukes, «AUTOMATIC SOIL MOISTURE-BASED DRIP IRRIGATION,» de *2003, Las Vegas, NV July 27-30*, St. Joseph, MI, 2003.

[8] B. Rabbi, Z.-H. Chen y S. Sethuvenkatraman, «Protected Cropping in Warm Climates: A Review of,» *Energies,* p. 2737, Julio 2019.

[9] G. Chaudhary, S. Kaur, B. mehta y R. Tewani, «Observer based fuzzy and PID controlled smart greenhouse,» *Journal of Statistics and Management Systems,* vol. 22, pp. 393-401, 2019.

[10] A. Manonmani, T. Thyagarajan y S. Sutha, «ANN based modeling and control of GHS for winter climate,» *2017 Trends in Industrial Measurement and Automation (TIMA),* Enero 2017.

[11] K. Ogata, Ingeniería de control moderna, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010.

[12] R. C. Dorf y R. H. Bishop, Sistemas de control moderno, Madrid: PEARSON EDUCATION, S. A., 2005.

[13] Delta Electronics, Inc., «Chapter 6 Applied Instructions,» de *AS Series Programming Manual*, Taoyuan City, 2018, pp. 198-212.

[14] G. Gong, R. Chiong, Q. Deng, W. Han, L. Zhang y D. Huang, «Energy-efficient production scheduling through machine on/off control,» *Engineering Applications of Artificial Intelligence,* vol. 104, pp. 104-359, 2021.

Semblanza Autores

Marco Antonio Beltrán Sánchez, es estudiante de ingeniería Mecatrónica en el Tecnológico Nacional de México campus Culiacán. Actualmente colabora como alumno de residencias en el Laboratorio de mecatrónica y control en la división de estudios de posgrado e investigación en el tecnológico de Culiacán.

Johan Amadeus Soto Montoya, es estudiante de ingeniería eléctrica en el Tecnológico Nacional de México, campus Culiacán. Actualmente colabora como alumno de residencias en el Laboratorio de Mecatrónica y Control de la División de Estudios de Posgrado e Investigación.

Cesar Gerardo Parra, Ingeniero en Electrónica (2023) y estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería del Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán.

Julio Cesar Picos Ponce, Ingeniero en Electrónica por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2003). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados, IPN, Unidad Guadalajara (2005). Doctor en Ciencias en Sistemas de Información por la Universidad Autónoma de Sinaloa, Campus Culiacán (2017).

Luis Enrique Barreto Salazar, es ingeniero electrónico con especialidad en automatización, Maestro en Ciencias de la Ingeniería en la especialidad de mecatrónica y control y Doctor en Ciencias de la Ingeniería en el área de instrumentación y control por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán.