Desarrollo de un sistema de control de riego para *Capsicum annuum L.* en invernadero microtúnel

Development of an irrigation control system for *Capsicum annuum L.* in micro-tunnel greenhouse cultivation

Cesar Gerardo Parra[1], Rubén López Rubio[1], Jabell A. Hernández Romo[1], David E. Castro Palazuelos[1], Julio C. Picos Ponce[1], Guillermo J. Rubio Astorga[1].

[1]Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán, División de estudios de posgrado e investigación, cesar.gp@culiacan.tecnm.mx

Resumen

En esta investigación se presenta el desarrollo de un sistema de control de la humedad del suelo aplicado al cultivo de chile serrano (Capsicum annuum L.) en un invernadero tipo microtúnel a escala laboratorio, con el objetivo de regular la humedad dentro de rangos adecuados para el desarrollo del cultivo. El sistema se implementa mediante un Controlador Lógico Programable (PLC), se considera el diseño y la sintonización de un algoritmo Proporcional–Integral–Derivativo (PID). El trabajo incluye el modelado matemático del actuador, este se representa por una bomba de riego, y la planta a controlar se modela como una maceta, donde se usa la analogía con sistema de nivel de tanque. Los subsistemas se analizan y simulan de manera individual, y como un sistema completo a través del software Simulink. El sistema físico integra sensores de humedad del suelo, un sensor de flujo para el monitoreo del consumo hídrico y una interfaz hombre maquina (HMI) para visualizar y extraer datos. Los resultados experimentales, obtenidos durante un periodo de operación de 44 días, muestran un control adecuado de la humedad del suelo y un uso eficiente del recurso hídrico, esto demuestra viabilidad del sistema propuesto para aplicaciones de riego en la agricultura protegida.

Palabras clave: Control, sistema de riego, invernadero.

Abstract

In this research, the development of a soil moisture control system applied to serrano chili (Capsicum annuum L.) cultivation in a laboratory-scale microtunnel greenhouse is presented, with the objective of regulating soil moisture within appropriate ranges for crop development. The system is implemented using a Programmable Logic Controller (PLC) and includes the design and tuning of a Proportional–Integral–Derivative (PID) control algorithm. The work includes the mathematical modeling of the actuator, represented by an irrigation pump, and the plant to be controlled, which is modeled as a pot using an analogy with a tank-level system. The subsystems are analyzed and simulated individually and as a complete system using Simulink software. The physical system integrates soil moisture sensors, a flow sensor for monitoring water consumption, and a human–machine interface (HMI) for data visualization and extraction. Experimental results obtained over a 44-day operating period show adequate soil moisture control and efficient use of water resources, demonstrating the viability of the proposed system for irrigation applications in protected agriculture.

Keywords: Control, irrigation system, green house.

Recibido: 01/12/2025; Publicado 30/12/2025

Introducción

El uso eficiente del agua en el sector agrícola es un desafío prioritario, en especial en países donde la agricultura representa el mayor consumidor de este recurso. En México, este sector concentra la mayor parte del consumo hídrico, con pérdidas significativas asociadas al uso de sistemas de riego tradicionales de baja eficiencia, lo que genera un impacto negativo tanto en la sostenibilidad ambiental como en la productividad agrícola [1], [2]. Ante este panorama, la tecnificación de los sistemas de riego se ha consolidado como una estrategia clave para reducir el desperdicio de agua y mejorar su aprovechamiento [3].

La implementación de sistemas de riego controlados permite satisfacer de manera precisa las necesidades hídricas y nutricionales de los cultivos, para contribuir al incremento del rendimiento agrícola y a la mejora de los beneficios económicos [4]. El monitoreo continuo de variables ambientales y del suelo se identifica como un elemento fundamental para la toma de decisiones y la mejora de la productividad en sistemas agrícolas modernos [5]. Estas tecnologías adquieren mayor relevancia cuando se integran con esquemas de agricultura protegida, como los invernaderos, los cuales permiten ajustar las condiciones ambientales para favorecer el desarrollo óptimo de los cultivos [6].

Los sistemas de riego tradicionales se basan en modelos de evapotranspiración, donde, se determina la cantidad de agua requerida para compensar las pérdidas por evaporación y transpiración vegetal [7]. Dichos modelos consideran variables climáticas como la radiación solar, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento [8]. Sin embargo, estos enfoques presentan limitaciones al no considerar de manera directa el estado hídrico del suelo, lo que puede derivar en aplicaciones excesivas de agua.

La humedad del suelo es una de las variables con mayor relevancia para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Mantenerla dentro de rangos óptimos mediante sistemas de riego de control automatizado permite reducir el consumo hídrico y mejorar la eficiencia del uso del agua [9]. La implementación de algoritmos de control en sistemas de riego demuestra ser una solución eficaz para regular la humedad del suelo, logra favorecer el crecimiento de las plantas y disminuir el desperdicio del recurso hídrico [10].

El desarrollo de soluciones que se basan en los principios de la agricultura 4.0 y la agricultura de precisión, caracterizadas por la integración de tecnologías de información, comunicación y automatización, consigue avanzar hacia sistemas agrícolas más inteligentes y sostenibles [11]–[14]. Dentro de este enfoque, el uso de controladores lógicos programables (PLC) y algoritmos de control industrial, como el control Proporcional–Integral–Derivativo (PID), demuestra ser una alternativa robusta y confiable para la automatización de procesos agrícolas [15], [16].

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un sistema de control y monitoreo para un sistema de riego en invernadero a escala piloto, basado en el uso de componentes industriales y algoritmos de control, con el objetivo de optimizar el uso del agua, mejorar las condiciones de cultivo y contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas eficientes y sostenibles.

Fundamentación Teórica

La agricultura protegida constituye una estrategia orientada al control parcial o total de variables ambientales para mejorar el rendimiento y la calidad de los cultivos. A diferencia del cultivo a cielo abierto, los sistemas protegidos permiten crear entornos estables, los cuales reducen las variaciones climáticas externas y favorecen el desarrollo vegetal [10]. En México, estas estructuras adquieren relevancia, esto se debe a que el sector agrícola concentra más del 70 %del consumo de agua. La disponibilidad limitada del recurso hídrico y la sobreexplotación de acuíferos exigen estrategias para optimizar su uso. Los sistemas protegidos contribuyen a incrementar la eficiencia hídrica al disminuir la evaporación directa del suelo y permitir un manejo preciso del riego.

El invernadero tipo microtúnel corresponde a una estructura semicircular construida con arcos de PVC o lámina galvanizada y cubierta con plástico agrícola. Esta infraestructura resguarda el cultivo frente a factores ambientales adversos como lluvias intensas, viento, granizo, radiación solar excesiva y variaciones de temperatura [11]. Además, su diseño cerrado limita el ingreso de plagas y reduce el uso de pesticidas. Estos invernaderos generan un microclima estable, disminuyen la evaporación del suelo y mejoran la eficiencia del riego en comparación con el cultivo a campo abierto [12].

La humedad del suelo se define como la cantidad de agua almacenada en los poros del sustrato y representa un parámetro crítico para el crecimiento y rendimiento de las plantas. Este contenido hídrico se expresa como humedad gravimétrica o volumétrica a partir de la relación entre la masa del suelo húmedo y seco [13]. El monitoreo de esta variable permite evaluar el estado hídrico del sustrato y establecer estrategias de riego eficientes. Para ello se emplean curvas de calibración que relacionan la señal de los sensores con el porcentaje real de humedad, lo cual permite obtener mediciones confiables del contenido de agua en el suelo [14].

El chile serrano (Capsicum annuum L.) representa un cultivo de importancia económica y alimentaria en México. Este cultivo requiere un suministro moderado de agua y muestra una sensibilidad al encharcamiento, esto resulta adecuado para su producción en sistemas protegidos [17]. La humedad óptima del suelo se ubica entre 70% y 85%. Un manejo inadecuado del riego provoca estrés hídrico, daño radicular y disminución del rendimiento. En contraste, un riego preciso favorece la uniformidad de los frutos y mejora la productividad.

La medición de la humedad del suelo representa un elemento fundamental en los sistemas de riego tecnificados, permite conocer en tiempo real el estado hídrico del sustrato y tomar decisiones precisas sobre la aplicación de agua. Los métodos de medición indirectos son los más utilizados, esto se debe a su facilidad de implementación y bajo costo [14]. Los sensores resistivos presentan simplicidad, aunque muestran sensibilidad a la salinidad y a la corrosión. En contraste, los sensores capacitivos miden la permitividad dieléctrica del suelo, ofrecen mayor estabilidad, resistencia a la corrosión y mejor repetibilidad, esto los hace adecuados para aplicaciones agrícolas.

En los sistemas de riego controlados, las bombas de agua funcionan como actuadores, estos suministran un el flujo de agua desde un depósito hacia la red de riego, en respuesta a la señal de control [18]. Las bombas de corriente directa con imanes permanentes facilitan la integración con los sistemas electrónicos. Por otro lado, las válvulas solenoides ON–OFF se emplean en sistemas de riego debido a su simplicidad de operación. Sin embargo, su operación binaria impide la regulación proporcional del caudal, esto genera sobre riego cuando no existe un control adecuado [15].

El control regula el comportamiento de sistemas dinámicos mediante una retroalimentación, con el propósito de mantener una variable de proceso en un valor deseado o setpoint. En un sistema de control en lazo cerrado, la variable medida se compara de forma continua con el valor de referencia, y el controlador genera una acción correctiva que reduce el error [16], [19].

En agricultura, esta técnica ayuda a conservar la del suelo dentro de rangos adecuados y mejora la eficiencia en el uso del agua [20]. El controlador Proporcional–Integral–Derivativo (PID) destaca por su simplicidad, robustez y amplia aceptación en aplicaciones industriales

y agrícolas [21]. La combinación de sus acciones permite reducir el error, eliminar desviaciones permanentes y anticipar variaciones, esto favorece un riego estable y una mayor eficiencia hídrica en comparación con métodos tradicionales [22].

Metodología

Se realiza el diseño, simulación e implementación de un sistema de control de humedad donde la planta a controlar es una maceta y el actuador es una bomba de agua. Primero, es necesario obtener los parámetros de actuador al analizar la respuesta de una función escalón en corriente, por medio de un osciloscopio, como se muestra en la figura 1.

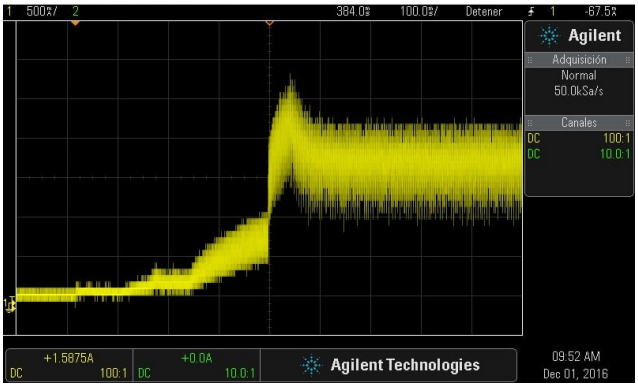


Figura 1. *Respuesta al escalón del motor de la bomba de agua.*

Al analizar la respuesta en escalón, se observa que el actuador se comporta como un sistema subamortiguado, la ecs. (1) representa este tipo de sistemas.

$$\frac{W_n^2}{S^2 + 2\xi W_n S + W_n^2} \tag{1}$$

donde:

W_n= La frecuencia natural del sistema.

ξ = Factor de amortiguamiento relativo.

Al sustituir los valores de W_n=25.1659 y ξ = 0.2980 en la ecs. (1) se obtiene la función de transferencia del motor de la bomba, como se muestra en la ecs. (2).

$$\frac{633.3225}{S^2 + 14.99988S + 633.3225}. \tag{2}$$

Para obtener una relación de la corriente con el flujo de la bomba de riego, se utiliza una ecuación de regresión lineal y el resultado se puede observar en la figura 2.

El modelado matemático de la planta describe la dinámica de la humedad del suelo dentro de una maceta, esto se considera como el proceso a controlar.

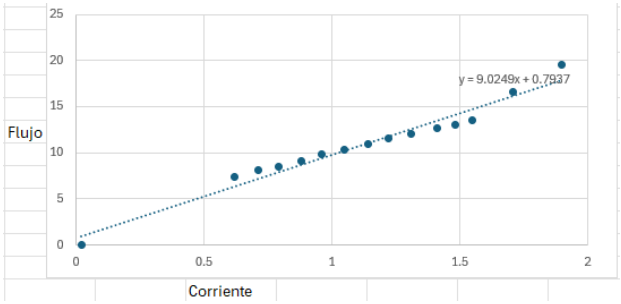


Figura 2. *Gráfica de correlación lineal corriente-flujo.*

La variable de salida del sistema es el porcentaje de humedad del suelo, el cual depende del balance entre el caudal de agua suministrado por el sistema de riego y las pérdidas asociadas a drenaje y evaporación. La humedad del suelo se define a partir de su formulación gravimétrica, esta se expresa como la ecs. (3):

$$H(\%) = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \tag{3}$$

donde:

$H(\%)$ = Porcentaje de humedad de suelo.

m_h = Masa del suelo húmedo.

m_s = Masa del suelo seco.

Esta expresión permite relacionar de manera directa la cantidad de agua almacenada en el sustrato con una variable medible y adecuada para fines de control.

Para modelar la dinámica del sistema, se emplea una analogía con un sistema de nivel de tanque, donde la maceta actúa como un elemento de almacenamiento, el flujo de riego representa la entrada del sistema y las pérdidas de agua constituyen la salida. Esto se aprecia en la figura 3.

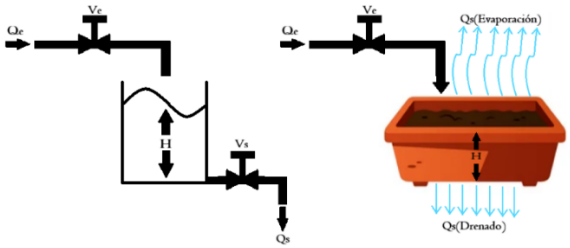


Figura 3. *Analogía de equivalencia entre maceta y sistema de nivel de tanque.*

El balance dinámico de masa se describe mediante la ecs. (4):

$$A\frac{dh(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \tag{4}$$

donde:

A = Area transversal efectiva de la maceta.
$h(t)$ = Nivel equivalente de agua asociado a la humedad de suelo.
Q_{in} = Caudal de entrada.
Q_{out} = Caudal de salida.
El flujo de salida se modela a partir de la ecs. (5) clásica de descarga hidráulica:

$$Q_{out}(t) = C_d A_o \sqrt{2gh(t)} \tag{5}$$

donde:
C_d = Coeficiente de descarga.
A_o = Área efectiva de salida.
Debido a la presencia del término no lineal $\sqrt{h(t)}$, el sistema se analiza alrededor del punto de operación h_0 esto puede provocar pequeñas variaciones alrededor del estado estacionario. Tras aplicar una expansión en series de Taylor de primer orden, se obtiene el modelo dinámico linealizado en la ecs. (6):

$$A\frac{d\Delta h(t)}{dt} = K_1 \Delta Q_{in} - K_2 \Delta h(t). \tag{6}$$

Donde K_1 y K_2 son constantes positivas que dependen de los parámetros físicos del sistema. Al aplicar la transformada de Laplace en la ecs. (6) y despejar la relación entrada-salida, se obtiene la función de transferencia de la planta, al sustituir los parámetros físicos reales del sistema, el modelado final se define como la ecs. (7):

$$\frac{H(s)}{\alpha_1(s)} = \frac{0.0039}{s + 0.00194}. \tag{7}$$

Esta ecuación corresponde a un sistema lineal de primer orden. Este modelo representa la dinámica del almacenamiento y liberación de agua en el suelo, y junto con la función de transferencia de la bomba, constituye la base matemática utilizada para el diseño del controlador PID. Finalmente, la evaporación se considera como una perturbación externa que reduce el volumen efectivo de agua disponible en el suelo y se incorpora al análisis del sistema durante la simulación y la sintonización del controlador por medio de la ecs. (8):

$$Q_{ev} = K_{ev} A_2. \tag{8}$$

En Culiacán, la velocidad de evaporación alcanza su valor máximo anual con 2,129.2 mm/mes. Al partir de este dato, se determina lo siguiente:
K_{ev} = Coeficiente de evaporación = $8.105x10^{-7}\ {}^{m}/_{s}$
A_2 = Área de superficie de evaporación = $1.2738\ m^2$
Al sustituir estos valores en la ecs. (8), se obtiene la evaporación incorporada en la simulación, como se muestra en la ecs. (9):

$$Q_{ev} = 1.0348x10^{-7}\ {}^{m^3}/_{s}. \tag{9}$$

Para realizar la simulación del modelado matemático del sistema se usa el *software* Simulink, además, se diseña el controlador PID, el cual consta de 3 valores proporcional, integral y derivativo, para estos valores se utiliza la opción de *autotuning* de Simulink y se realiza un ajuste manual a estos valores hasta obtener el resultado deseado. Durante la sintonización del controlador se determina que la constante derivativa (K_d) introduce perturbaciones. Por este motivo se establece $K_d = 0$ y el sistema opera bajo una configuración PI. En la figura 4 se muestra el diagrama de bloques de la del modelado completo y en la tabla 1 se resumen los valores de la sintonización del algoritmo de control.

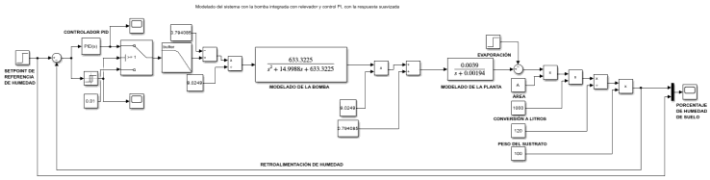


Figura 4. *Modelado completo del sistema de control.*

Tabla 1. *Valores del controlador PID sintonizado.*

Kp	Ki	Kd
0.5266	0.1025	0

Resultados

Al simular el sistema se propone un valor de 80% de humedad para la referencia de humedad la cual es la línea azul, mientras que la línea amarilla representa la respuesta del sistema con control aplicado, se muestra en la figura 5.
La implementación física del sistema está compuesta por diversos dispositivos. El controlador principal es un PLC (controlador lógico programable) modelo AS218TX-A, el cual se encarga de ejecutar el algoritmo de control. Para el monitoreo y la extracción de datos se utiliza una interfaz hombre maquina HMI (por sus siglas en inglés, *Human Machine Interface*).

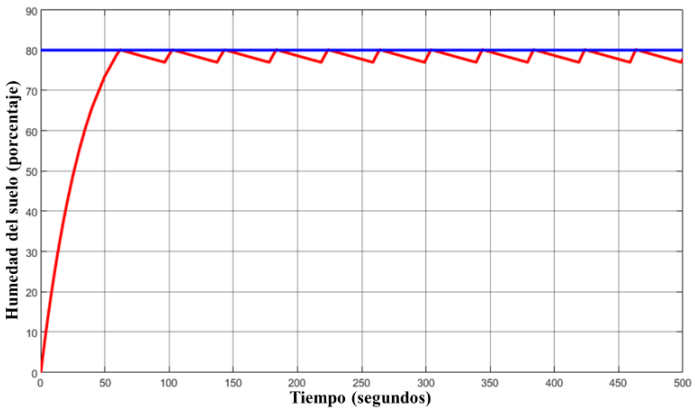


Figura 5. *Grafica de simulación del modelado completo con control.*

El actuador del sistema es una bomba para riego de 50 W y 24 VCD. La medición de la humedad del suelo se realiza mediante un sensor capacitivo de tres hilos, señal (azul), tierra (verde) y alimentación (rojo), con salida analógica de 4 – 20 mA. Asimismo, para el monitoreo del consumo hídrico se incorpora un sensor de flujo de efecto hall modelo YF-S201. Además, se incluye un sensor de temperatura y humedad ambiente modelo THD100, para complementar el monitoreo ambiental del sistema, aunque no influye de manera directa en la planta a controlar. La interconexión de los componentes del sistema se presenta en la figura 6.

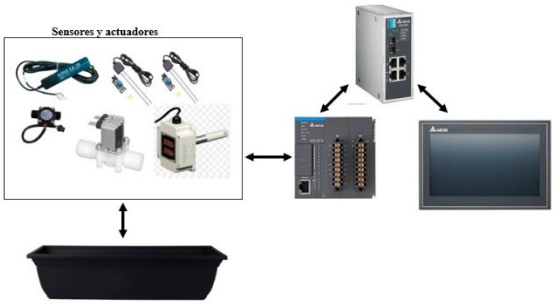


Figura 6. *Diagrama de conexiones del sistema de control.*

Para programar el control PID en el PLC se utiliza el bloque de función "DPID", En este se configura mediante valores booleanos para su funcionamiento y se le agregan los valores del PID sintonizados de la tabla 1, a su salida se obtiene una señal PWM. Lo anterior se muestra en la figura 7.

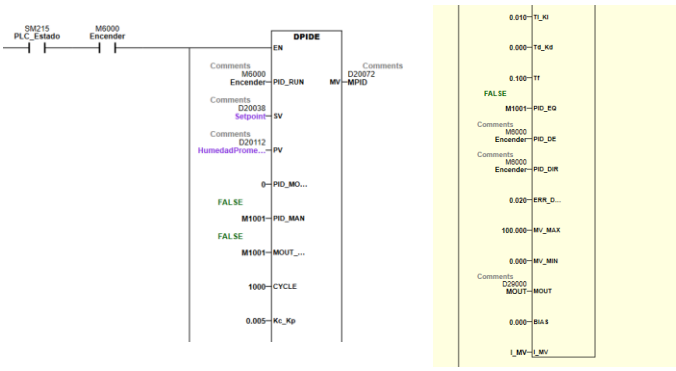


Figura 7. *Configuración del bloque PID.*

El desempeño del sistema con control PID se evalúa durante un periodo de operación de 44 días (del 27 de octubre al 10 de diciembre de 2025), se registran lecturas de humedad del suelo a razón de una muestra por minuto mediante tres sensores y el valor de referencia se establece en 80 %.

En la figura 8 se muestra el comportamiento de la humedad del suelo durante el periodo experimental. La variable se mantiene cercana al valor de referencia, sin embargo, se presentan sobreimpulsos que alcanzan valores superiores al 85 % e incluso al 90 % de humedad, estos sobre riegos son periodos de corta duración y no generan saturación prolongada del sustrato. Este comportamiento se asocia principalmente a la acción integral del controlador.

El análisis estadístico arroja un Error Medio Absoluto (EMA) de 4.83 % y un Error Estándar (EE) de 6.50 %, con un valor promedio de humedad de 84.82 % y una desviación estándar de 4.36 %. Estas métricas evidencian un comportamiento estable del sistema y un error promedio reducido, a pesar de la presencia periódica de un sobre riego.

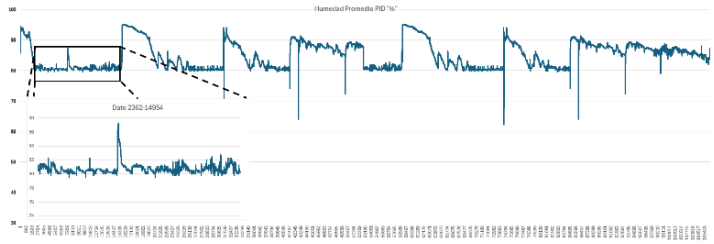


Figura 8. *Comportamiento de la humedad del suelo durante el experimento.*

El sistema registra un consumo total de 153.3 L de agua durante los 44 días del periodo experimental, para un conjunto de nueve macetas con cultivos de *Capsicum annuum L.* el consumo hídrico se mide mediante el sensor de flujo YF-S201, el cual monitorea el caudal en tiempo real y permite la acumulación del volumen total suministrado. Esto corresponde a un consumo promedio de 3.48 L/día para el sistema completo y de aproximadamente 0.39 L/día por maceta. La figura 9 muestra la evolución del consumo hídrico a lo largo del periodo experimental, esto permite analizar el comportamiento del uso del agua en función de la operación del sistema de riego y del control de la humedad del suelo.

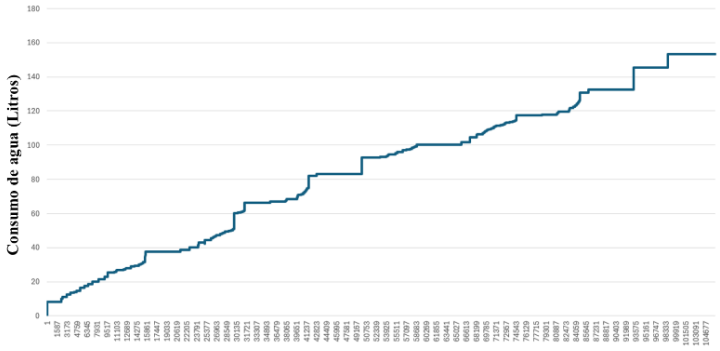


Figura 9. *Gráfica de consumo hídrico del sistema.*

Conclusiones

El modelo del sistema presenta diferencias respecto al comportamiento real, esto se debe a factores externos y a las características propias del proceso. La humedad del suelo muestra una dinámica lenta, lo cual introduce retardos en la respuesta del sistema. El modelado del motor de la bomba presenta limitaciones por la falta de parámetros por parte del fabricante. No obstante, el comportamiento del modelo se asemeja al sistema real. La analogía de la maceta como un sistema equivalente a un nivel de tanque de agua permite obtener un modelo preciso y facilita el diseño del algoritmo de control.

La aplicación del sistema de control permite el uso eficiente del recurso hídrico en comparación con los métodos tradicionales, como el riego por inundación. El sistema mantiene la humedad del suelo cercana al valor de referencia, con un Error Medio Absoluto de 4.83 % y un Error Estándar de 6.50 %, lo que refleja un desempeño estable. Durante el periodo experimental, el sistema registra un consumo total de 153.3 L. No obstante, al no existir una comparación directa con un sistema de referencia, no se cuantifica el porcentaje de reducción en el uso de agua.

La calibración de los sensores es un proceso fundamental para garantizar el funcionamiento del sistema de monitoreo y control. Una calibración correcta asegura mediciones confiables y permite que el controlador trabaje de forma adecuada para mantener los niveles de humedad del suelo durante la operación del sistema.

El uso de equipo industrial, como los controladores lógicos programables (PLC) y la pantalla HMI, permite la integración de modelos matemáticos, algoritmos de control y monitoreo en un entorno agrícola real, esto presenta una alternativa viable para mejorar el uso del recurso hídrico en los sistemas de rego de agricultura protegida.

Como trabajo futuro, se propone incluir un grupo control con riego manual o tradicional, con el fin de cuantificar de forma directa el porcentaje de ahorro hídrico del sistema controlado frente al método riego convencional.

Referencias

[1] FAO, El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2020. Roma: FAO, 2020. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.4060/cb1447es

[2] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), "Tipos de estructura para la agricultura protegida," gob.mx, 7 de enero de 2020. [En línea]. Disponible: https://www.gob.mx/agricultura/articulos/agricultura-protegida-otra-manera-decultivar

[3] L. Patroo, K. Thacooree, y A. Mungur, "A Smart Precision Irrigation and Monitoring System," en Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 561, pp. 105– 114, 2019. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.1007/978-3-030-18240-3_10

[4] H. Flores-Gallardo, E. Sifuentes-Ibarra, H. Flores-Magdaleno, W. OjedaBustamante, y C. R. Ramos-García, "Técnicas de conservación del agua en riego por gravedad a nivel parcelario," Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, vol. 5, no. 2, pp. 241-252, 2014. [En línea]. Disponible: https://www.redalyc.org/pdf/2631/263129784006.pdf

[5] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2018, Mayo 14). "¿Cómo beneficia la agricultura a las familias mexicanas?". Gobierno de México. [En línea]. Disponible: https://www.gob.mx/agricultura/articulos/como-beneficia-la-agriculturaa-las-familias-mexicanas

[6] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Censo Agropecuario 2022. Resultados definitivos. Nacional. Aguascalientes, México: INEGI, 2023. [En línea]. Disponible: https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ca/2022/doc/ca2022_rdnal.pdf

[7] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Estadísticas del Agua en México 2021. Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021. [En línea]. Disponible: https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html 75

[8] J. Flores Velázquez y W. Ojeda Bustamante, Consideraciones agronómicas para el diseño de invernaderos típicos de México. Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2015

[9] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). "Cierre de la producción agrícola". Gobierno de México. [En línea]. Disponible: https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/

[10] Food and Agriculture Organization (FAO), The State of Food and Agriculture 2022: Water for Food and Agriculture. Rome, Italy: FAO, 2022.

[11] J. López-Gómez y P. García-Moya, Invernaderos: Diseño, Construcción y Manejo. Ciudad de México, México: Editorial Trillas, 2019.

[12] P. Juárez López, R. Bugarín Montoya, R. Castro Brindis, A. L. SánchezMonteón, E. Cruz-Crespo, C. R. Juárez Rosete, G. Alejo Santiago, y R. Balois Morales, "Estructuras utilizadas en la agricultura protegida," Revista Fuente, vol. 3, no. 8, pp. 21–27, Jul.–Sep. 2011. [En línea]. Disponible en: https://cdn.blueberriesconsulting.com/2016/10/estudio191016.pdf

[13] F. Martínez-González, F. Sosa-Pérez, y J. Ortiz-Medel, "Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza," Tecnología y Ciencias del Agua, vol. 1, no. 4, pp. 89–103, 2010. [En línea]. Disponible: https://www.redalyc.org/pdf/3535/353531971005.pdf

[14] C. Caicedo-Rosero, F. J. Méndez-Ávila, E. Gutiérrez-Zeferino, y J. J. A. FloresCuautle, "Medición de humedad en suelos: Revisión de métodos y características," Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas

e Ingenierías del ICBI, vol. 9, no. 17, pp. 1–8, jul. 2021. [En línea]. Disponible en: https://portal.amelica.org/ameli/journal/595/5952727005/html/
[15] J. A. León-Mostacero, "Desarrollo de un sistema de riego de precisión mediante electroválvulas y tablas de riego," Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, vol. 8, no. 4, 2017. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222017000400101&script=sci_arttext
[16] K. Ogata, Modern Control Engineering, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010.
[17] R. Medina-López, "Comportamiento agronómico del chile serrano bajo diferentes condiciones de riego," Revista Fitotecnia Mexicana, vol. 42, no. 1, pp. 45– 53, 2019. 76
[18] C. G. Parra, R. Urquidez López, D. Ríos Torres, D. E. Castro Palazuelos, J. C. Picos Ponce, y G. J. Rubio Astorga, "Diseño de control y monitoreo para sistema de riego en invernadero escala piloto," Geovoltaica Revista de Energía y Sostenibilidad, vol. 1, no. 1, pp. 7-11, ene.-abr. 2025.
[19] M. A. Carpio Alemán, Introducción al análisis e implementación de sistemas de control automático, Universidad Tecnológica del Sur de Ecuador, 2017. [En línea].
Disponible en: https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19069/1/Introduccio%CC%81n%20al%20ana%CC%81lisis%20e%20implementacio%CC%81n%20de%20sistemas%20de%20control%20automa%CC%81tico.pdf
[20] K. Araya-Portuguez y G. Fuentes-Quirós, "Sistema de riego automatizado para zonas rurales," Tecnología en Marcha, vol. 37, núm. especial, pp. 92–102, jun. 2024. doi: 10.18845/tm.v37i5.7222
[21] K. J. Åström y R. M. Murray, Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2008.
[22] A. Shandilya, M. S. Rana, y T. Dewangan, "PID-Based Irrigation Control for Greenhouse Cultivation," International Journal of Automation and Smart Technology, vol. 11, no. 2, pp. 95–104, 2022.

Semblanza Autores

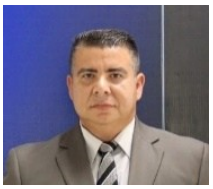
Cesar Gerardo Parra, Ingeniero en Electrónica (2023) y Maestro en Ciencias de la Ingeniería (2025) por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán.

Rubén López Rubio, Estudiante de Ingeniería en Electrónica por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán.

Jabell Armando Hernández Romo, Estudiante de Ingeniería en Electrónica por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán.

David Enrique Castro Palazuelos, Ingeniero Electrónico por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2000). Maestro en Ciencias en Telemática por la Universidad de Colima (2004) y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialización en Telecomunicaciones por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Guadalajara (2015).

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).



Guillermo Javier Rubio Astorga Ingeniero Eléctrico por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (1998). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica (2001) y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica (2013) por el CINVESTAV del IPN, Unidad Guadalajara.