

Recibido 27 Septiembre 2018, aceptado 4 Diciembre 2018, fecha de publicación 16 Diciembre 2018

ISSN 2448-7775

Implementación de Técnicas de Control PID, Lógica Difusa y Redes Neuronales para el Control de Variables Físicas en un Invernadero para Producción de Germinados

LUIS E. BARRETO S.¹, JULIO C. PICOS P.¹, MARTÍN A. ALARCÓN C.¹,
JESÚS J. ROCHÍN M.¹, GUILLERMO J. RUBIO A.¹

¹Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Culiacán. Culiacán, Sinaloa, México.
Barretosalazar20@gmail.com
julio.picos.ponce@gmail.com
alarchem@gmail.com
jaimeochoin@itculiacan.edu.mx
guillermo.rubio@itculiacan.edu.mx

RESUMEN En este trabajo se presenta la implementación de tres técnicas de control que se utilizan en el área industrial y de investigación, aplicadas a un invernadero prototipo tipo capilla, donde se requiere controlar la temperatura del ambiente y la humedad relativa del suelo. Esta implementación se realiza en el ambiente de LabVIEW y se utiliza una placa Arduino Mega 2560. El trabajo se considera la base para el planteamiento de un sistema macro para la agricultura de germinado.

PALABRAS CLAVE Lógica Difusa (LD), Redes Neuronales (RN), Proporcional-Integral-Derivativo (PID), Germinación Invernadero.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los procesos para la germinación de semillas se llevan a cabo con distintos métodos para su producción. Uno de estos es el artesanal, el cual se presenta en zonas donde las condiciones del suelo y el clima son favorables para el desarrollo adecuado de la plántula. Esto limita a que se siembre solo en temporadas específicas si se requiere un rendimiento óptimo. Otra opción es una cámara germinadora la cual se utiliza en la industria, pero el costo en este caso es elevado [1].

Cuando no se cumplen las condiciones necesarias para la germinación de la semilla se puede presentar la aparición de hongos, los cuales afectan el proceso de crecimiento de la plántula y dan características indeseables en el producto [2]. El objetivo del control del medio ambiente en un invernadero es generar un entorno favorable para el desarrollo del cultivo de germinado con el fin de tener resultados óptimos en rendimiento y calidad en la producción. La dinámica del sistema de los invernaderos es no lineal con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Por lo que el modelado de la dinámica del invernadero puede llegar a ser complejo [3]. Alrededor del 95% de los controladores que se implementan en la industria utilizan

controles PID, con la limitante de que su funcionamiento se ve comprometido debido a que se pueden presentar problemas de sintonización a causa de perturbaciones [4].

El avance de la tecnología computacional ha permitido que se apliquen técnicas alternativas en los sistemas de control, las cuales permiten modelar sistemas con dinámicas complejas de manera relativamente sencilla. A este campo de estudio se le denomina control inteligente. Dentro de este tipo de técnicas se encuentra la lógica difusa (LD), las redes neuronales (RN), los sistemas neuro-difusos, los algoritmos evolutivos, entre otros.

La aplicación de la teoría de lógica difusa en sistemas de control es de interés, ya que nos permite tratar con información vaga e imprecisa, misma que es complicada de modelar con ecuaciones diferenciales. Con la lógica difusa, la dinámica del sistema y las acciones de control se modelan con reglas del tipo IF - THEN, las cuales se construyen con base a información que se deriva de la experiencia de los operadores del proceso [3].

La aplicación de la teoría sobre Redes Neuronales (RN) también se ha extendido en los sistemas de control en las últimas décadas. La dinámica de un sistema y las acciones de control se pueden modelar con RN que han sido previamente entrenadas con ciertos algoritmos a partir de conjuntos de datos de entrada

– salida del sistema, considerados como deseables. Esto representa una gran ventaja, ya que la RN entrenada es capaz de predecir la dinámica del sistema y la acción de control correspondiente, cuando se presenten conjuntos de datos que no se encontraban originalmente dentro de los datos de entrenamiento de esta [5].

En [1] se presenta el valor nutricional de germinados de huauzontle, calabacita y amaranto donde al utilizar el método artesanal se demuestra que bajo condiciones óptimas se puede tener mayor contenido de proteína. En [6] se implementa un control on – off y PID para el control de temperatura y humedad de suelo en un invernadero, donde se menciona que el control PID cumple con el objetivo de control y ahorro de recursos económicos. En [7] se propone un diseño de control difuso para el control de temperatura y humedad de relativa dentro de un invernadero. Por otro lado, en [8] se propone la opción de utilizar una red neuronal múltiple para el control de temperatura y humedad relativa en un invernadero, donde se demuestra que la red neuronal múltiple exhibe un menor error en comparación con el de neuronas individuales.

En este trabajo, a diferencia de [1], [6], [7] y [8], se realiza una implementación práctica de 3 técnicas de control que son PID, LD y RN, sobre un banco de pruebas, con el fin de compararlas y documentar sus ventajas y desventajas. Estos resultados sirven como referencia para decidir cual técnica de control es la más adecuada para generar las condiciones de temperatura en la producción de germinados en un invernadero.

En la Sección II se define el banco de pruebas, donde se describe la construcción del prototipo y los componentes que lo integran. En las Secciones III y IV se desarrolla la implementación de las técnicas de control y se muestran los resultados; finalmente, en V se presentan las conclusiones del trabajo.

II. DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

A. INVERNADERO

Se desea controlar la temperatura ambiente y la humedad relativa de la tierra, para lo cual es necesaria la instalación de sensores de temperatura, así como de humedad de suelo en un prototipo de invernadero. Las dimensiones del prototipo son de 65 x 40 x 40 cm, con estructura de perfil de 1.9 cm y paredes de acrílico con grosor de 3 mm. En su interior cuenta con dos maceteros para plantas y tuberías de 1.27 cm para la circulación del riego. La circuitería electrónica se aloja en un gabinete en la parte externa del prototipo para la protección de las placas y el cableado, Fig. 1.



Fig. 1. Prototipo físico del invernadero.

B. CONTROLADOR LABVIEW

LabVIEW 2013 es la plataforma que se utiliza para el desarrollo de las técnicas de control que se implementan en el prototipo. En esta plataforma se realizan las tareas de análisis, filtrado, monitoreo y visualización de toda la información proveniente de los sensores del invernadero, así como el control de los actuadores. La comunicación entre LabVIEW y Arduino se establece por medio de un puerto serie y el *Toolkit LabVIEW Interface for Arduino*.

C. ARDUINO COMO TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ) CON LABVIEW

El sistema se controla por medio de una placa Arduino Mega 2560 la cual cumple con las funciones de recepción y envío de datos de los sensores y actuadores. Para que Arduino se comunique con LabVIEW es necesario utilizar la librería LIFA_Base en el microcontrolador.

D. SENSORES

Se utilizaron los sensores que se muestran en la Tabla I.

E. ACTUADORES Y PLACAS EXTERNAS

Se utilizaron los actuadores y placas externas que se muestran en la Tabla II.

III. IMPLEMENTACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL

Se implementan tres técnicas de control en el prototipo: PID, LD y RN. Las estrategias se utilizan para el control de la temperatura interna del invernadero y se evalúa su desempeño con base en el comportamiento de la planta.

TABLA I. LISTADO DE SENSORES.

Cant.	Modelo	Descripción
2	LM35	Temperatura interior y exterior del invernadero.
4	HL-69	Humedad relativa del suelo en 4 puntos distintos (la lectura final es el promedio de los 4).

TABLA II. LISTADO DE ACTUADORES Y PLACAS EXTERNAS.

Cant.	Componente	Descripción
2	Bombilla de 12 vcd y 60 W	Aumenta la temperatura int.
2	Ventilador de 12 vcd	Disminuye la temperatura int.
1	Monster Motor Shield Vnh2sp	Puente H para bombillas.
2	L298N	Puente H para ventiladores y bomba de agua.
1	Bomba de agua sumergible de 12vcd	Suministrar agua de riego.

A. DIAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA

En la Fig. 2 se muestra el diagrama general del sistema en el que se implementan las técnicas de control PID, LD y RN.

B. CONTROL INTEGRAL-PROPORCIONAL-DERIVATIVO

Un controlador PID es un mecanismo de control realimentado, ampliamente utilizado en sistemas de control industrial. En esta estrategia se calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado. El algoritmo se basa en tres parámetros diferentes, el proporcional (k_p), el integral (k_i) y el derivativo (k_d) [3].

La ecuación que describe el control PID se define como (1).

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

El control PID se implementa en LabVIEW por medio del *LabVIEW PID Toolkit*, el cual permite ingresar los datos de las ganancias k_p , k_i y k_d . Las ganancias para el control de temperatura se determinan de forma experimental y sus valores se muestran en la Tabla III [9]. El diagrama del sistema de control PID se muestra en la Fig. 3.

C. CONTROL POR LÓGICA DIFUSA

El controlador difuso de temperatura que se implementa en la Fig. 4, utiliza dos variables de estado y una de control. La primera variable de estado es denominada $Error_{temp}$, y se define como la diferencia entre la temperatura deseada y la temperatura real en el interior del prototipo. La segunda variable, $Error_{externo}$, toma su valor de la diferencia aritmética entre la temperatura deseada y la temperatura ambiental. Esta variable tiene como función compensar la energía calorífica que se disipa en el ambiente. Por último, se cuenta con una variable de control que se nombra *Variación de temperatura*.

Las funciones de pertenencia de las dos variables de estado son de tipo triangular y trapezoidal. En la Tabla IV se detallan los valores de los conjuntos que pertenecen a la variable $Error_{temp}$.

El uso de la variable $Error_{externo}$, pretende compensar los efectos de disipación térmica cuando el gradiente de temperatura aumenta entre el ambiente y el interior del prototipo. Para esta variable se crearon las funciones de pertenencia de la Tabla V.

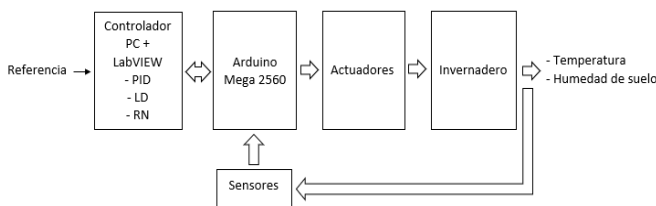


Fig. 2. Diagrama de bloques general del sistema.

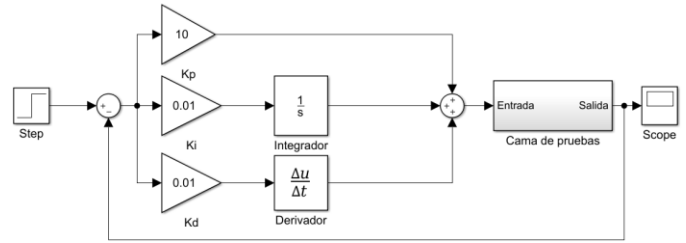


Fig. 3. Estrategia de Control PID implementada en Simulink.

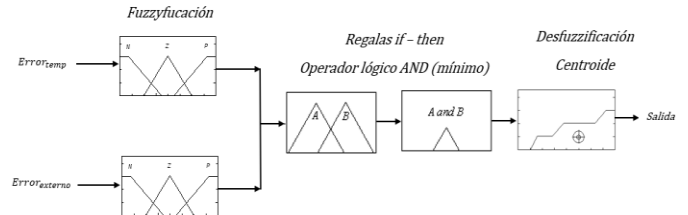


Fig. 4. Diagrama de bloques del controlador difuso.

TABLA III. GANANCIAS PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA.

Ganancias	Valor de ganancias para calefacción	Valor de ganancias para ventilación
k_p	10.00	10.00
k_i	0.01	1.00
k_d	0.01	0.01

TABLA IV. CONJUNTOS DIFUSOS DE LA VARIABLE $Error_{temp}$.

Conjunto	Vértice 1	Vértice 2 (punta)	Vértice 3	Vértice 4 (Trapezio)
Negativo Alto	-15	15	-4	-1.3
Negativo Normal	-2	-1.3	-6	N/A
Negativo Bajo	-1.4	-0.6	-0.2	N/A
Normal	-0.2	0	0.5	N/A
Positivo Bajo	0	1	2	N/A
Positivo Normal	1	2	3	N/A
Positivo Alto	2	5	15	15

TABLA V. CONJUNTOS DIFUSOS DE LA VARIABLE $Error_{externo}$.

Conjunto	Vértice 1	Vértice 2 (punta)	Vértice 3	Vértice 4 (Trapezio)
Normal	-2.5	0	2.5	N/A
Dif. Pos. Muy Baja	1	2.5	4	N/A
Dif. Pos. Baja	2.5	4.25	6	N/A
Dif. Pos. Normal	4	6	8	N/A
Dif. Pos. Alta	6	8	13	13

Los conjuntos de la variable de control se diseñan de tipo triangular y gaussiano, declarando 5 funciones de pertenencia para la calefacción, 3 para el enfriamiento y 1 para mantener la temperatura del sistema, tal y como se observa en la Tabla VI.

El rango del eje horizontal comprende valores que van desde los -293 hasta los 293. Al utilizar el método de defuzzificación mediante el cálculo del centroide, el máximo valor representable es 255, con ello se asegura que el convertidor DAC de 8 bits de la tarjeta Arduino operará en todo su rango. Con base en los conjuntos difusos previamente mostrados, el razonamiento, experiencia y pruebas, se definen las reglas de control para el calentamiento, como se muestra en la Tabla VII.

Para el caso del enfriamiento se utilizan las reglas de control que se muestran en la Tabla VIII.

En la Fig. 5 se muestra la relación de las dos variables de estado con la variable de control.

TABLA VI. CONJUNTOS DIFUSOS DE LA VARIABLE.
Variación de temperatura

Conjunto	Vértice 1	Vértice 2 (punta)	Vértice 3	Vértice 4 (Gaussiano)
Bajada Alta	-293	-293	-170	N/A
Bajada Normal	-240	-170	-100	N/A
Bajada Baja	-170	-100	-30	N/A
Normal	-30	-1	1	30
Subida muy Pequeña	0	30	60	N/A
Subida Pequeña	30	70	115	N/A
Subida Normal	60	115	170	N/A
Subida Baja	115	170	230	N/A
Subida Alta	170	293	293	N/A

TABLA VII. REGLAS DE CONTROL PARA EL CALENTAMIENTO.

Error _{temp}	Error _{externo}				
	Normal	Dif. Pos. MB	Dif. Pos. B	Dif. Pos. N	Dif. Pos. A
Normal	MAN	MAN	MAN	SMP	SP
Pos. Bajo	SNB	SNA	SA	SA	SA
Pos. Normal	SNA	SA	SA	SA	SA
Pos. Alto	SA	SA	SA	SA	SA

Donde MAN: Mantener, SNB: Subida Normal Baja, SNA: Subida Normal Alta, SA: Subida Alta, SNA: Subida Normal Alta, SP: Subida Pequeña.

TABLA VIII. REGLAS DE CONTROL PARA EL ENFRIAMIENTO.

Error _{temp}	Acción de control
Negativo Bajo	Bajada Baja
Negativo normal	Bajada Normal
Negativo Alto	Bajada Alta

En este caso se utiliza el método Mamdani y el operador lógico AND, correspondiente al valor mínimo. Así mismo, el proceso de defuzzificación se implementa por medio del método de centroides.

D. CONTROL POR REDES NEURONALES

En este trabajo se implementa una red neuronal para el control de temperatura, como se muestra en la Fig. 6.

Las variables de la red son las siguientes:

- Entrada.
- Bias de entrada (valor fijo de 1).
- Pesos de entrada W_1 y W_2 .
- Pesos de bias de entrada W_{b1} y W_{b2} .
- Pesos de salida W_{s1} y W_{s2} .
- Bias de salida (Valor fijo de 1).
- Peso bias de salida W_{bs} .

Para el aprendizaje de la red neuronal se utiliza el algoritmo de aprendizaje supervisado de Retropropagación (*Backpropagation*). Este tipo de aprendizaje consiste en ajustar los pesos y el valor bias, tratando de minimizar el error cuadrático. El entrenamiento de Retropropagación se realiza por medio del cálculo de δ_i y δ_j , variables necesarias para determinar el valor de los nuevos pesos. Para esto se considera la variable y_i que es la salida de la red, así como y_i^d que es el valor de la salida deseada [10]. Las fórmulas para el cálculo de las variables δ_i y δ_j , se muestran en (2) y (3).

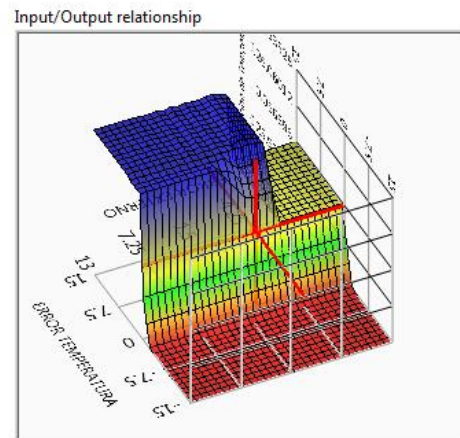


Fig. 5. Rule Viewer del sistema de control por LD.

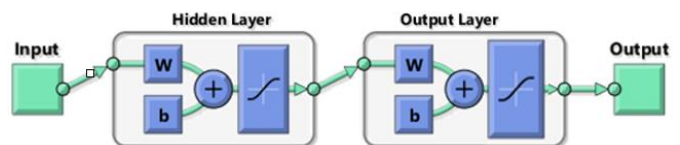


Fig. 6. Diagrama de bloques del control por redes neuronales implementado en MATLAB.

Para la actualización de los pesos w_{ij} y w_{jk} se utilizan las relaciones (4) y (5), donde se calculan previamente δ_i y δ_j , y se incorpora la tasa de aprendizaje η . En la Ecuación (4) se actualizan los pesos de salida, mientras que en la Ecuación (5) se actualizan los pesos de entrada a la red neuronal.

$$\delta_i = y_i(1 - y_i)(y_i^d - y_i) \quad (2)$$

$$\delta_j = v_j(1 - v_j) \sum_i \delta_i w_{ij} \quad (3)$$

$$w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) + \eta \delta_i v_j \quad (4)$$

$$w_{jk}(t + 1) = w_{jk}(t) + \eta \delta_j w_{ij} \quad (5)$$

El error total E se determina a través de la Ecuación (6).

$$E = \frac{1}{2} \sum (y_i^d - y_i)^2 \quad (6)$$

Los datos de referencia a utilizar en el algoritmo de aprendizaje se construyen a partir de los pares de datos (Error presente, voltaje PWM deseado), los cuales emulan los resultados que se obtienen de la aplicación con la estrategia de control por LD. El valor del error presente varía de -1 a 1°C en intervalos de 0.05°C .

En el algoritmo se utiliza la función de activación *sigmoide* para acotar la salida de -1 a 1 . Una vez ingresados los valores de entrada y los valores deseados, se establece $\eta = 0.5$ para el inicio del entrenamiento.

IV. RESULTADOS

A. CONTROL INTEGRAL-PROPORCIONAL-DERIVATIVO

En la Fig. 7 se muestra la gráfica del control PID que se implementa en el invernadero, donde se establecen valores de referencia en 23°C , 25°C y 27°C .

El control PID no presenta sensibilidad al ruido que ocasionan los sensores. En la referencia de 23°C se muestra un error de $\pm 0.2^\circ\text{C}$. En la referencia de 25°C se presenta un error de $\pm 0.6^\circ\text{C}$, mientras que en 27°C se provoca un error de $\pm 0.3^\circ\text{C}$. El incremento de temperatura para los tres valores de referencia se realiza de forma escalonada.

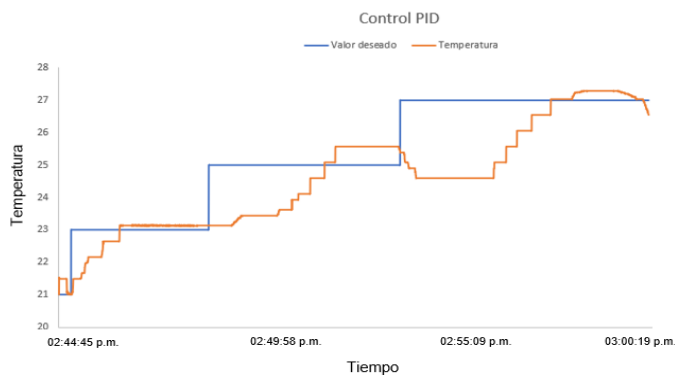


Fig. 7. Control de temperatura por PID.

B. CONTROL POR LÓGICA DIFUSA

En la Fig. 8 se aprecia el comportamiento del controlador por lógica difusa, para las referencias de 23°C , 25°C y 27°C . El incremento en la temperatura se realiza de una manera uniforme para valores bajos y de forma escalonada en valores elevados. En la referencia de 23°C se presenta un error de $\pm 0.2^\circ\text{C}$. Para 25°C se obtiene un error de $\pm 0.3^\circ\text{C}$ y en 27°C se presenta un error de $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Este tipo de control exhibe una alta sensibilidad al ruido de los sensores.

C. CONTROL POR REDES NEURONALES

Los valores que se obtienen para los pesos, al llegar a un valor de error de 0.004 , se muestran en la Tabla IX. En la Fig. 9 se muestra el comportamiento del controlador basado en Redes Neuronales. Como se observa en la figura, la temperatura interna del invernadero se aproxima hacia el valor deseado, y cuando llega al punto de referencia de 23°C , se observa un error en estado estable de $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Cuando se establece la referencia de 25°C , se presenta un error de $\pm 0.1^\circ\text{C}$ y para 27°C se genera un error de $\pm 0.2^\circ\text{C}$.

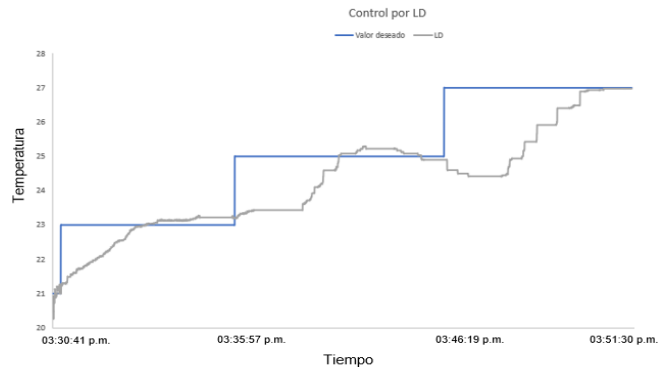


Fig. 8. Control de temperatura por LD.

TABLA IX. VALORES DE LOS PESOS DE SALIDA.

Pesos	Valores
W_1	-4.08236
W_2	-4.08236
W_{b1}	-0.00676
W_{b2}	-0.00676
W_{s1}	-4.35985
W_{s2}	-4.35985
W_{bs}	2.67746

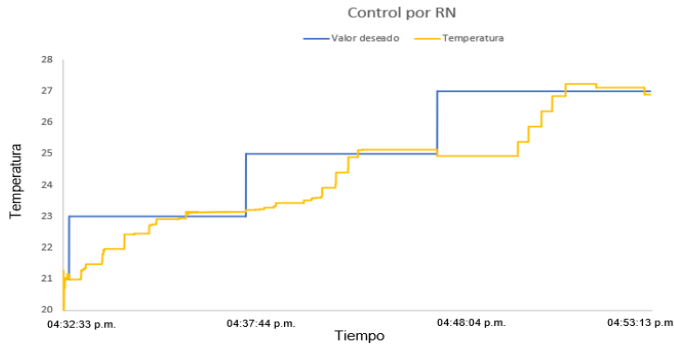


Fig. 9. Control de temperatura por RN.

D. COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL IMPLEMENTADAS

En la Fig. 10 se comparan los tres tipos de control donde se establecen los tres valores de referencia mencionados en las subsecciones anteriores, 23°C, 25°C y 27°C.

En la Fig. 10 se observa como con el controlador PID se alcanzan de manera rápida los tres valores de referencia. No obstante, es la estrategia de control que presenta un mayor error por el sobre-impulso. El control por LD exhibe un error menor que el control PID, pero tarda más tiempo en alcanzar el valor de referencia. Por otro lado, el controlador por RN es el que muestra el error de menor magnitud de las tres técnicas de control que se implementaron, pero también exhibe un retardo. El comportamiento de la RN es similar al controlador por LD en algunas partes de la gráfica, debido a que los valores de entrenamiento de la RN se obtienen de la implementación por LD como se menciona en la Sección III.

V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó la implementación de tres estrategias de control, el control PID, el control por LD y el control por RN, empleadas para controlar las variables físicas en un invernadero de germinados. En esta implementación se determinó que la variable a controlar es la temperatura, ya que es la que tiene mayor impacto en el proceso de germinado. Las

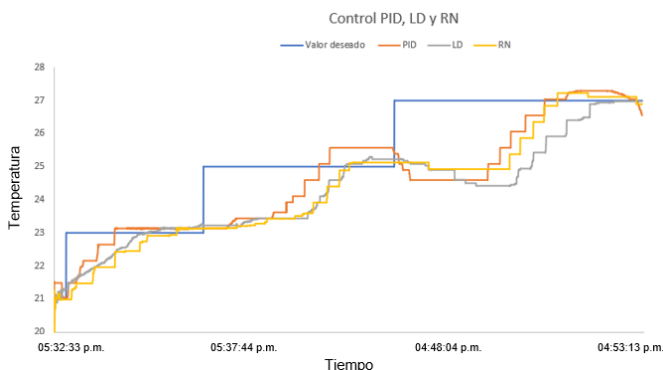


Fig. 10. Comparación de señales de temperatura generadas por las estrategias de control por PID, LD y RN.

técnicas de control se evaluaron estableciendo tres diferentes puntos de referencia donde se compara el error que presentan y el tiempo que demoran en alcanzar el valor deseado. Las tres técnicas implementadas no presentaron un error mayor a $\pm 0.6^\circ\text{C}$, por lo que se puede concluir que para la problemática que se presentó al inicio, los tres controladores operan de forma adecuada; sin embargo, se opta por elegir el control por RN para la germinación de semillas, por ser el que presenta menor error en la implementación.

En [6] se presenta la implementación de un control PID para la temperatura interna de un invernadero donde se establece una referencia de 23°C con un error de $\pm 1^\circ\text{C}$. En este trabajo el resultado del control PID con una referencia de 23°C tiene un error de $\pm 0.2^\circ\text{C}$.

En [7] se evalúa el diseño de un control difuso para la temperatura interna de un invernadero donde se tiene como resultado un error de $\pm 0.5^\circ\text{C}$. En este trabajo para un valor de referencia de 25°C se tiene un error de $\pm 0.3^\circ\text{C}$.

Finalmente, en [8] se evalúa la temperatura interna de un invernadero con una Red Neuronal del tipo Elman donde se establece un valor deseado de 11°C y se obtiene un error de $\pm 0.5^\circ\text{C}$. En este trabajo la red neuronal que se implementó con el algoritmo de aprendizaje de Retropropagación, para un valor deseado de 23°C , tiene un error de $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

REFERENCIAS

- [1] B. Yáñez, V. Verduzco, G. Mateos y C. León, «Valor nutricional y contenido de saponinas en germinados de huauzontle, calabacita y amaranto.» Chapingo serie horticultura, p. 7, 2009.
- [2] J. Castañón y L. Del Río, Guía para el diagnóstico y control de enfermedades en cultivos de importancia económica, Honduras: Zamorano, 1994.
- [3] Y. Su, L. Xu y D. Li, «Adaptive Fuzzy Control of a Class of MIMO Nonlinear System With Actuator Saturation for Greenhouse Climate Control Problem.» IEEE Transactions on automation science and engineering, Vol. 13, n° 2, p. 17, 2016.
- [4] O. Katsuhiko, Ingeniería de control moderna, Madrid, España: Pearson Educacion, 2010.
- [5] S. Zeng, H. Hu, L. Xu y G. Li, «Nonlinear adaptive PID control for greenhouse environment based on RBF network.» Sensors, vol. 12, pp. 5328 - 5348, 2012.
- [6] M. Vera, R. O. -. Comparán, A. Rienzo, M. D. -. Mermoud y G. Lefranc, «Variables control of a modular greenhouse.» 2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), vol. 13, n° 2, p. 17, 2017.
- [7] P. Salgado y J. Boaventura, «Greenhouse climate hierarchical fuzzy modelling.» Control Engineering practice, n° 13, pp. 613-628, 2005.
- [8] F. Fourati, «Multiple neural control of a greenhouse.» Elsevier, vol. 139, p. 7, 2014.
- [9] M. Anaya, B. Victor, p. Jesús y F. Montaña, «Diseño de controladores P, PI y PID para el comportamiento dinámico de un servo-sistema hidráulico, basado en desarrollo experimental.» Epistemus, vol. XVI, pp. 13-21, 2014.
- [10] J. Jerome, A. P. Aravind, V. Arunkumar and P. Balasubramanian, "LabVIEW based Intelligent Controllers for Speed Regulation of Electric Motor," 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, Ottawa, Ont., pp. 935-94. 2005.