



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Desarrollo del control del déficit de presión de vapor en un micro – invernadero para la producción de germinados

Vapor pressure deficit development control in a micro – greenhouse for sprouts production

Barreto-Salazar, L.E., Padilla-Rochin, J.D., Picos-Ponce, J.C., Rubio-Astorga, G.J.

Departamento de División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Culiacán, C.P. 80220 Culiacán, Sinaloa.

luis.barreto@itculiacan.edu.mx; m15170916@culiacan.tecm.mx; julio.pp@culiacan.tecnm.mx; guillermo.ra@culiacan.tecnm.mx

Innovación tecnológica: Aplicación de controles inteligentes para la producción de germinados.

Área de aplicación industrial: Agricultura protegida, industria de alimentos.

Recibido: 05 abril 2021

Aceptado: 15 septiembre 2021

Abstract

In this work the evaluation and implementation of the Proportional-Integral-Derivative (PID), Fuzzy Logic (FL) and Neural Networks (NN) control techniques were carried out in two thermal systems, one for temperature and the other for humidity to control the vapor pressure deficit (VPD) in a micro-greenhouse for the production of sprouts. A mathematical model of these systems was established to evaluate the behavior of the control algorithms and subsequently carry out their implementation. As a result of the simulation of the intelligent control algorithm, a difference of 0.4 °C is obtained with FL for temperature and 0.05% with NN for humidity, and a VPD of 0.02kPa was obtained. In the implementation, the control by FL presented a standard error of $30.02 \pm 0.002^{\circ}\text{C}$ and the NN of $77 \pm 0.11\%$, with these results the VPD presented a standard error of $0.93 \pm 0.004\text{kPa}$ which is considered within the range for the adequate development of the sprouts.

Keywords: Control System; Greenhouse; Humidity; Temperature; VPD.

Resumen

En este trabajo se realiza la evaluación e implementación de técnicas de control Proporcional-Integral-Derivativo (PID), Lógica Difusa (LD) y Redes Neuronales (RN) en dos sistemas térmicos, uno de temperatura y otro de humedad para el control del déficit de presión de vapor (DPV) en un micro-invernadero para producción de germinados. Se establece un modelo matemático de estos sistemas para evaluar el comportamiento de los algoritmos de control y posteriormente realizar su implementación. Como resultado de la simulación del algoritmo de control inteligente se obtiene una diferencia de 0.4°C con LD para temperatura, y 0.05% con RN para humedad, por lo tanto, se obtuvo un DPV de 0.02 kPa . En la implementación, el control por LD presentó un error estándar de $30.02 \pm 0.002^{\circ}\text{C}$ y la RN de $77 \pm 0.11\%$. Con estos resultados el DPV obtuvo un error estándar de $0.93 \pm 0.004\text{ kPa}$, lo que se considera dentro del rango establecido para el desarrollo de los germinados.

Palabras clave: DPV; Humedad; Sistema de control; Invernadero; Temperatura.

1. Introducción

En la actualidad la producción de alimentos se enfrenta a problemáticas relacionadas con insuficiencia en productividad debido a las condiciones ambientales a las que se expone (Amitrano et al., 2019; Calzada Riborosa, 2017). Para esto, se ha demostrado que el control de variables físicas como la temperatura y humedad son necesarias para el crecimiento de los cultivos (Vargas et al., 2018). Estas variables se pueden controlar en micro-invernaderos utilizados para producción de germinados, los cuales, son estructuras pequeñas que se encuentran cerradas, pueden estar dentro de un área reducida y emulan la forma de invernaderos agrícolas (García et al., 2016).

En el sistema anterior, el control con retroalimentación mantiene una relación de la variable del sistema con otra, comparándolas y usando el error como un medio de control (Dorf & Bishop, 2005). A diferencia de un sistema automatizado, donde se realiza la sincronización de una serie de acciones de un proceso donde las máquinas pueden ser capaces de realizar tareas de forma automática con la mínima intervención humana (Tangarife et al.,

2020). Las técnicas de control que se utilizan comúnmente en la industria son del tipo ON-OFF y PID debido a su fácil aplicación para resolver problemas prácticos y sus bajos costos de implementación (Ogata, 2010). Sin embargo, también existen los controles inteligentes como LD y RN, que han tomado relevancia debido a los avances tecnológicos a nivel electrónico, hardware y procesadores computacionales (Santos, 2011). Se han realizado investigaciones donde utilizan estas técnicas de control para generar las condiciones adecuadas de temperatura y humedad en un invernadero como lo presenta Benyezza et al., (2018). También se han estudiado intercambiadores de calor para control de temperatura variando la velocidad del aire (Yang et al., 2019). En Puspitasari & Perdana (2018) utilizan una red de sensores inalámbricos (WSN) para el control de temperatura en invernadero. En otra investigación realizada por Zarnescu et al., (2019) se utiliza el intercambio de masas de aire entre el interior y el exterior de un invernadero, para el control de temperatura. También Núñez et al., (2018) presentaron un control proporcional – integral (PI) con

autoajuste difuso para la humedad en un invernadero.

Con las técnicas antes mencionadas es posible controlar la temperatura y humedad, las cuales tienen impacto en la producción de alimentos como los germinados. Las semillas germinadas son alimentos frescos que se encuentran en crecimiento y que su valor nutricional incrementa hasta el momento que se consume Vega et al., (2017). Por lo tanto, la temperatura se relaciona con las enzimas que producen una serie de reacciones químicas que influye en el crecimiento de la semilla Caroca et al., (2016). Por otra parte, la humedad presenta relación con aparición de enfermedades provocadas por condensación y en la transpiración del cultivo Limwiwattana et al., (2016). Estas dos variables son necesarias para determinar el valor del déficit de presión de vapor (DPV) en ambientes controlados. Desde el punto de vista físico, el DPV es la diferencia de la presión de vapor de saturación (PV_{sat}) y la presión de vapor del aire (PV_{aire}). El PV_{sat} se relaciona directamente con la temperatura y el PV_{aire} con la humedad (Tobias & Abraham, 2008). El DPV se puede controlar de manera indirecta por medio de la temperatura y humedad. Por lo tanto, es posible utilizar algoritmos de control clásico e inteligentes que permitan controlar el DPV por medio de la temperatura y la humedad (Choaba et al., 2019; Vassilyeva et al., 2017).

En investigaciones realizadas previamente se ha estudiado el control de temperatura y humedad en invernaderos. Por ejemplo, Núñez et al., (2018) estudiaron en simulación un control PI convencional y un PI con autoajuste difuso para el control de humedad en donde este último presentó mejores resultados al obtener un error de 0.3%. En Ma et al., (2017) se presentó la implementación de un controlador híbrido con cortina húmeda para controlar temperatura en un invernadero donde se obtuvo un error de 0.5°C. En otra

investigación, Kazuhisa & Yuma, (2017) se aplica un control predictivo para temperatura con algoritmo genético en donde se obtiene un error promedio de 1.2°C. En Puspitasari & Perdana, (2018) se usa la red de sensores inalámbricos (WSN) con un enrutamiento de *multi-hop routing* para el control de temperatura y humedad en un invernadero, en el cual se obtuvo como resultado un error promedio de 1°C y 2.05%. En Zarnescu et al., (2019) estudiaron el intercambio de masas de aire entre el interior y el exterior de un invernadero. Para disminuir la temperatura interior se implementa una técnica basada en la vaporización del agua a alta presión, donde el generador de vapores es impulsado por un controlador automático que mide la temperatura y humedad dentro del invernadero, en el cual se obtuvo un error máximo promedio en el control de temperatura de 2.7°C.

En este trabajo se propone el desarrollo del control del DPV en un micro-invernadero para producción de germinados. En el punto 2 se establece un modelo matemático que describe la dinámica de la temperatura y humedad en el micro-invernadero adaptadas a un modelo de DPV, así como también se presenta el diseño de los sistemas térmicos para estas variables. En el punto 3 se diseñan los controles para cada variable y en el punto 4 se evalúa el comportamiento del DPV con diferentes algoritmos de control para realizar la implementación en el micro-invernadero.

2. Sistemas térmicos

2.1. Modelo matemático de temperatura

El DPV se calcula con la Ec. (1), (2) y (3) propuesta por Murray, (1966) y utilizada recientemente por Shamshiri et al., (2017). Para la temperatura en el micro-invernadero se utilizaron dos sistemas térmicos diferentes, uno de calefacción y otro de enfriamiento. Para su análisis, se tomó como base la primera ley de termodinámica la cual dice que

la velocidad de transferencia de calor desde el fluido caliente es igual a la transferencia de calor hacia el fluido frío como se menciona en Cengel & Boles, (2012). Por lo tanto, se tiene la Ec. (4).

$$DPV = [PV_{sal} - PV_{aire}] \quad \text{(Ec. 1)}$$

$$PV_{sal} = 0.61078 \left(e^{-\left[\frac{(17.27)(T)}{237.3+T} \right]} \right) \quad \text{(Ec. 2)}$$

$$PV_{aire} = \left(\frac{RH}{100} \right) (PV_{sal}) \quad \text{(Ec. 3)}$$

$$\dot{Q}_{agua} = \dot{Q}_{aire} \quad \text{(Ec. 4)}$$

Donde:

\dot{Q}_{agua} = Transferencia de calor real del agua

\dot{Q}_{aire} = Transferencia de calor real del aire

La variable de interés es la temperatura del aire de salida ($T_{a,sal}$), la cual se controla al modificar el flujo másico del agua (\dot{m}_{ag}) que toma valores de 0 a 0.06 kg/s. Por lo tanto, para la calefacción se utilizó la Ec. (5) y para el enfriamiento la Ec. (6).

$$\frac{\dot{m}_{ag} c_{pag} (T_{ag,en} - T_{ag,sal}) + \dot{m}_a c_{pa} T_{a,en}}{\dot{m}_a c_{pa}} = T_{a,sal} \quad \text{(Ec. 5)}$$

$$\frac{\dot{m}_{ag} c_{pag} (T_{ag,sal} - T_{ag,en}) - \dot{m}_a c_{pa} T_{a,en}}{\dot{m}_a c_{pa}} = -T_{a,sal} \quad \text{(Ec. 6)}$$

Donde:

\dot{m}_{ag} = Flujo másico del agua

\dot{m}_a = Flujo másico del aire

c_{pag} = Calor específico del agua

c_{pa} = Calor específico del aire

$T_{ag,en}$ = Temperatura del agua de entrada

$T_{a,en}$ = Temperatura del aire de entrada

$T_{ag,sal}$ = Temperatura del agua de salida

$T_{a,sal}$ = Temperatura del aire de salida

En el enfriamiento $-T_{a,sal}$ es negativo debido a que el sistema extrae calor del micro-invernadero, por lo tanto, se presenta una pérdida de energía en forma de calor.

2.2. Modelo matemático de humedad

El sistema de humedad se representa como un sistema de saturación adiabática, que se compone de un tanque de agua de forma tubular en el cual, por medio de un flujo de aire se aumenta el contenido de humedad dentro del micro-invernadero. Al suministrar agua de reposición al tanque a la tasa de evaporación y a la temperatura, el proceso se puede analizar como flujo constante. Se considera en la Ec. (7) que el flujo másico de aire (\dot{m}_a) toma valores de 0 a 0.033 kg/s y es igual en la entrada y salida, por lo tanto, en la Ec. (8) el \dot{m}_a y el flujo másico de evaporación (\dot{m}_f) se relacionan (Cengel & Boles, 2012).

$$\dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a1} \quad \text{(Ec. 7)}$$

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_a (h_2 - h_1)}{h_{fg2}} \quad \text{(Ec. 8)}$$

Donde:

\dot{m}_{a1} = Flujo másico de entrada del aire

\dot{m}_{a2} = Flujo másico de salida del aire

h_1 = Entalpia de entrada

h_2 = Entalpia de salida

h_{fg2} = Entalpia de evaporación

Se obtienen h_1 y h_2 cómo se muestran en las Ec. (9) y (10) para sustituirse en la Ec. (8). Para el control de humedad en el micro-invernadero se modificará el valor de \dot{m}_f .

$$h_1 = \left(\left(c_{pa}T_2 + \frac{(0.622)\varphi_2 p_{g2}}{p - \varphi_2 v_{g2}} \right) (h_{vapor} + c_{pvapor}T_2) \right) \quad \text{(Ec. 9)}$$

$$h_2 = \left(\left(c_{pa}T_1 + \frac{(0.622)\varphi_1 p_{g1}}{p - \varphi_1 v_{g1}} \right) (h_{vapor} + c_{pvapor}T_1) \right) \quad \text{(Ec. 10)}$$

Donde:

c_{pa} = Calor específico del aire

h_{vapor} = Entalpia de vapor de agua

c_{pvapor} = Calor específico medio del vapor del agua

p = Presión atmosférica

p_{g1} = Presión de saturación a temperatura de entrada

p_{g2} = Presión de saturación a temperatura de salida

φ_1 = Humedad relativa de entrada

φ_2 = Humedad relativa de salida

T_1 = Temperatura de entrada

T_2 = Temperatura de salida.

Posteriormente se obtiene φ_2 como se muestra en la Ec. (11).

$$\varphi_2 = \frac{(w_2)P}{(0.622 + (w_2))P_{g2}} \quad \text{(Ec. 11)}$$

Con las Ecs. (8), (9) y (10) es posible describir el comportamiento de (\dot{m}_f) en el sistema de humedad, lo que permite controlar la humedad relativa en el interior del micro-invernadero.

2.3. Diseño de los sistemas térmicos y cama de pruebas.

Los diseños del sistema de temperatura y humedad se realizaron en el software SolidWorks. En la Figura 1 se muestra el sistema de temperatura y en la Figura 2 se puede observar el diseño del sistema de humidificación. Posteriormente, se realizó la construcción y el montaje de los sistemas térmicos al micro-invernadero como se muestra en la Figura 3. En la Tabla 1 se enlistan los componentes utilizados para cada uno de los sistemas que se mencionaron anteriormente.

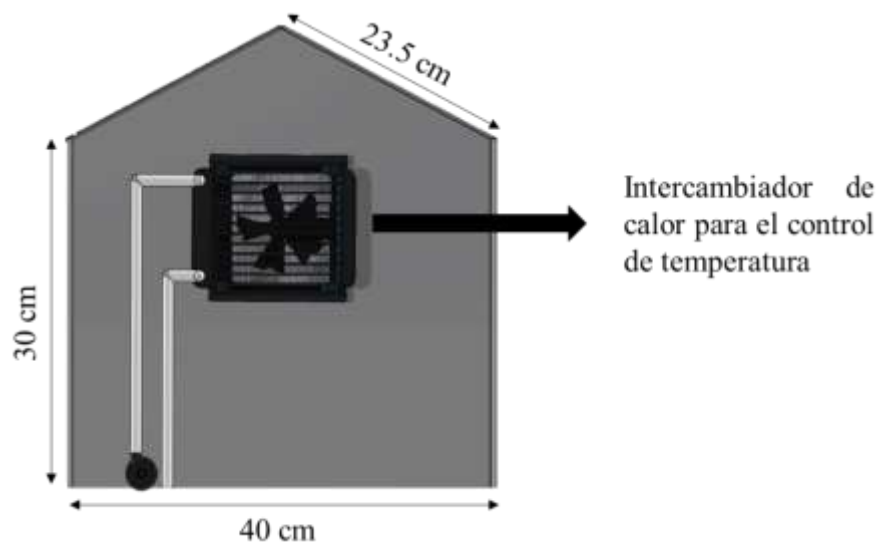


Figura 1. Diseño del sistema térmico en SolidWorks para temperatura en el micro-invernadero.

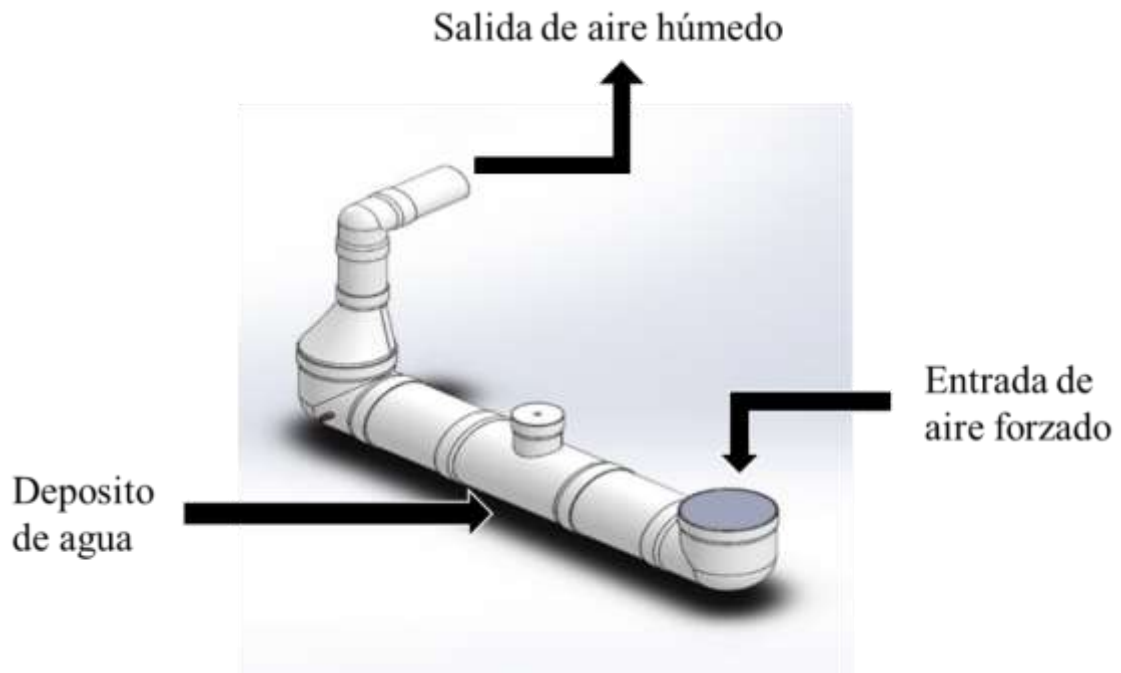


Figura 2. Diseño del sistema térmico para humedad en el micro-invernadero.

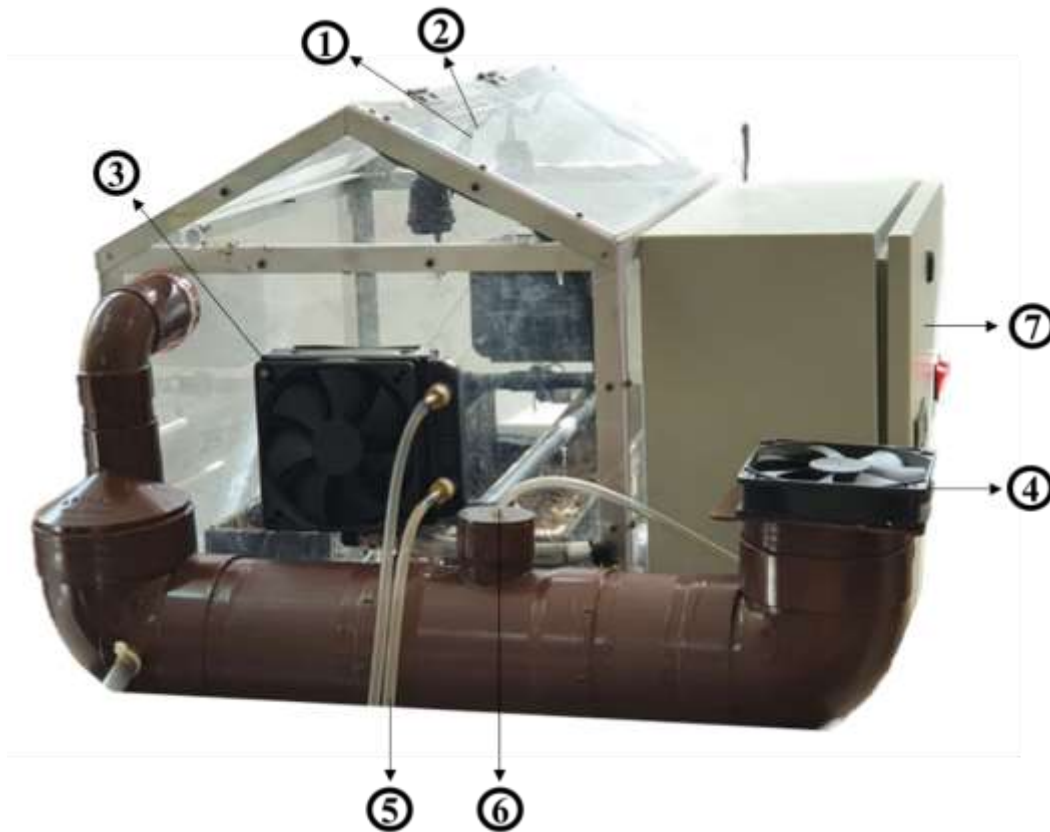


Figura 3. Montaje de sistemas térmicos en el micro-invernadero.

Tabla 1. Componentes utilizados en el micro-invernadero.

Componente	Función
Sensor DHT22 (1)	Lectura de la temperatura y humedad relativa.
Sensor DS18B20 (2)	Lectura de la temperatura del agua.
Ventilador para sistema de temperatura (3)	Flujo de aire hacia el interior del micro-invernadero a través del intercambiador de calor.
Ventilador para sistema de humedad (4)	Flujo de aire saturado con vapor de agua hacia el interior del micro-invernadero.
Línea de bomba sumergible para sistema de temperatura (5)	Flujo de agua en el intercambiador de calor para calefacción y enfriamiento.
Línea de bomba sumergible para sistema de humedad (6)	Flujo de agua de reposición para el tanque.
Arduino Mega 2560 (dentro de gabinete) (7)	Tarjeta de adquisición de datos.

3. Desarrollo del control de DPV

Se realizó el diseño y simulación del sistema de temperatura y humedad para el control del DPV en Simulink. Para esto se diseñaron los algoritmos de control PID, LD y RN para ser evaluados con cada variable.

3.1. Control de temperatura

El control PID se diseñó utilizando la herramienta PID Controller en Simulink. Los valores de sintonización obtenidos son $K_p=0.5$, $K_i=0.01$ y $K_d=1$. La ecuación que

describe el algoritmo de control PID se muestra en la Ec. (12).

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

K = Ganancia

$e(t)$ = Error

T_i = Ganancia integral

τ = Variable de integración

T_d = Ganancia derivativa

El control por LD se diseñó con dos variables de estado y una variable de control: $ErrorTemp_{Int}$, $ErrorTemp_{Ext}$ y $VarTemp_{Int}$. Se establecieron los conjuntos difusos para estas variables como se muestra en la Tabla 2, 3 y 4. Se determinaron veinte reglas difusas como se observa en la Tabla 5. Se utilizó el método de inferencia de Mamdani (Velandia et al., (2021). En la Figura 4 se muestra el visor de reglas donde se observa la relación de las variables de estado con la variable de control.

Tabla 2. Conjuntos difusos de $ErrorTemp_{Int}$ en °C.

Conjunto	$ErrorTemp_{Int}$			Trapecio
	Vértice 1	Vértice 2	Vértice 3	
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

N/A: No Aplica.

Tabla 3. Conjuntos difusos de $ErrorTemp_{Ext}$ °C.

$ErrorTemp_{Ext}$				
Conjunto	Vértice 1	Vértice 2	Vértice 3	Trapezio
Normal	-2.5	0	2.5	N/A
Diferencia Positiva Baja	1	2.5	4	N/A
Diferencia Positiva Normal	2.5	4.2	6	N/A
Diferencia Positiva Alta	4	6	8	N/A
Diferencia Positiva Muy Alta	6	8	17	17

N/A: No Aplica.

Tabla 4. Conjuntos difusos de $VarTemp_{Int}$ en Kg/s.

$VarTemp_{Int}$				
Conjunto	Vértice 1	Vértice 2	Vértice 3	Trapezio
Mantener	-0.007	0	0.007	N/A
Subida Muy Pequeña	0	0.007	0.014	N/A
Subida Pequeña	0.007	0.016	0.027	N/A
Subida Normal Baja	0.014	0.027	0.04	N/A
Subida Normal Alta	0.027	0.04	0.05	N/A
Subida Alta	0.04	0.05	0.06	0.06

N/A: No Aplica.

Tabla 5. Reglas difusas para control de temperatura.

$Error_{int}$				
$Error_{ext}$	Normal	Positivo Bajo	Positivo Normal	Positivo Alto
Normal	MAN	SNB	SNA	SA
Diferencia Positiva Muy Baja	MAN	SNA	SA	SA
Diferencia Positiva Baja	MAN	SA	SA	SA
Diferencia Positiva Normal	SMP	SA	SA	SA
Diferencia Positiva Normal Alta	SP	SA	SA	SA

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

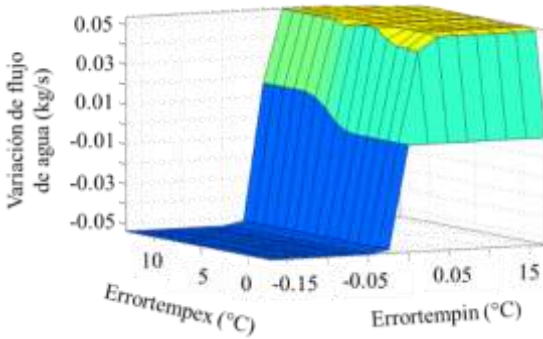


Figura 4. Visor de reglas difusas en Matlab.

Para el control de temperatura por RN se diseñó una red neuronal con una capa oculta de tres neuronas. Los datos de entrada para el entrenamiento con el algoritmo de retropropagación se encuentran en el rango de 0 a 1°C los cuales corresponden al error de temperatura. Los datos de salida pertenecen al rango de 0 a 0.06 kg/s que indican los valores que toma el \dot{m}_{ag} . Se obtuvo un Error Cuadrático Medio (ECM) de $9.07e-5$. Los valores de los pesos de entrada (W_1, W_2 y W_3) y salida (W_{s1}, W_{s2} y W_{s3}) se presentan en la Tabla 6. En la Figura 5 se muestra el diagrama de bloques del control por RN para temperatura.

Tabla 6. Pesos de RN para control de temperatura.

Pesos	Valor
W_1	0.1749
W_2	0.1811
W_3	-0.1793
W_{s1}	1.9054
W_{s2}	1.8350
W_{s3}	-1.8999

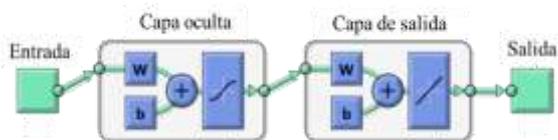


Figura 5. Diagrama de bloques de control por RN en Matlab.

3.2. Control de Humedad

El control PID para humedad en el micro-invernadero se diseñó con la herramienta PID Controller. Los valores de sintonización que se obtuvieron son para $K_p= 2$, $K_i=0.1$ y $K_d= 0.1$.

El control por LD se diseñó con una variable de estado y una variable de control: *ErrorHum* y *ControlHum*. El *ErrorHum* puede tomar valores de error de 0 a 45% y *ControlHum* toma valores de 0 a 0.033kg/s correspondiente a \dot{m}_a . Estos valores se muestran en la Tabla 7 y 8. Se establecieron 8 reglas difusas como se muestra en la Tabla 9 y se utilizó el método de Mamdani (Izquierdo & Izquierdo, 2018).

Tabla 7. Valores de *ErrorHum* en %.

Conjunto	<i>ErrorHum</i>		
	Vértice 1	Vértice 2	Vértice 3
Bajo	0	2.5	5
Positivo Muy Bajo	2.5	10	20
Positivo Bajo	5	15	25
Normal	10	20	30
Positivo Normal	15	25	35
Positivo Alto	20	30	40
Positivo Muy Alto	25	35	45

Tabla 8. Valores de *ControlHum* en kg/S.

<i>ControlHum</i>				
Conjunto	Vértice 1	Vértice 2	Vértice 3	Trapezio
Muy Bajo	0.012	0.016	0.021	N/A
Bajo	0.014	0.018	0.023	N/A
Normal Bajo	0.016	0.020	0.025	N/A
Normal	0.019	0.023	0.027	N/A
Normal Alto	0.022	0.025	0.029	N/A
Alto	0.024	0.027	0.030	N/A
Muy Alto	0.026	0.029	0.033	N/A
Subida Muy Alta	0.028	0.029	0.33	0.033

Tabla 9. Reglas difusas para control de humedad.

<i>ErrorHum</i>	<i>ControlHum</i>
Negativo	Muy Bajo
Positivo Muy Bajo	Bajo
Positivo Bajo	Normal Bajo
Normal	Normal
Positivo Normal	Normal Alto
Positivo Alto	Alto
Positivo Muy Alto	Muy Alto
Positivo Muy Alto	Subida Muy Alta

El control de humedad por RN se entrenó con el algoritmo de retropropagación con una capa oculta de dos neuronas. Los valores de entrada varían de 0 a 5% de error de humedad. Los valores deseados se encuentran en el

rango de 0 a 0.033kg/s correspondiente a los valores que toma la variable \dot{m}_a . Se obtuvo un error cuadrático medio de 3.58e-4. En la Tabla 10 se muestran los pesos obtenidos del entrenamiento de la RN.

Tabla 10. Pesos de RN para control de humedad.

Pesos	Valor
W_1	0.2749
W_2	0.2655
W_{s1}	1.5497
W_{s2}	2.2482

4. Resultados y discusión

4.1. Evaluación de controles para temperatura y humedad

Para el control de temperatura y humedad se tomaron como base las condiciones necesarias para germinados de ajonjolí (*Sesamum indicum* L.), por lo tanto, para la temperatura se estableció una referencia de 30°C iniciando de 24°C y para la humedad se estableció una referencia de 75% iniciando de 60%.

Para la temperatura el control PID obtuvo una diferencia de 0.6°C, el control por LD de 0.4°C y la RN de 0.7°C con respecto a la referencia. En la Figura 6 se muestra la comparación de los resultados de esta evaluación.

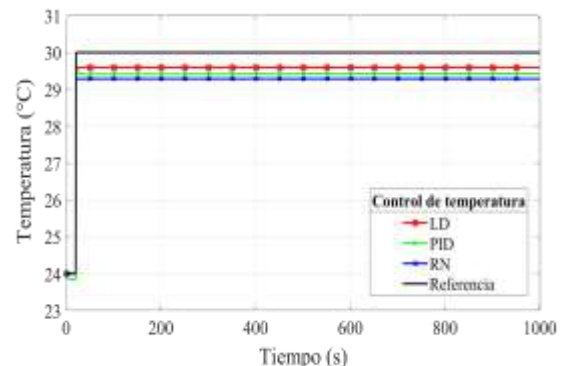


Figura 6. Comparación de controles para el sistema de temperatura.

Para la humedad el control PID presentó una diferencia de 0.8%, LD de 0.2% y la RN de 0.05% con respecto a la referencia. En la Figura 7 se observa la comparación de la simulación de estos controles.

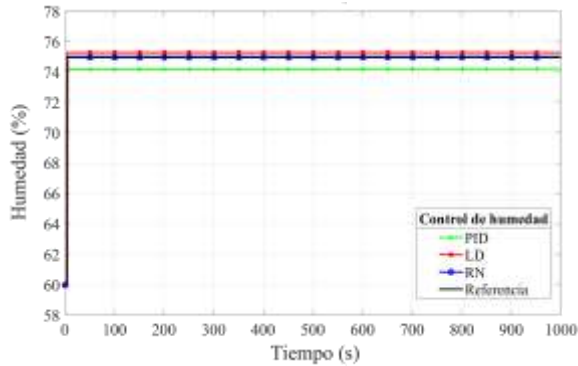


Figura 7. Comparación de controles para el sistema de humedad.

4.1.1. DPV

A partir de los controles evaluados anteriormente, se seleccionó el control por LD para temperatura y por RN para humedad, debido a que presentaron menor diferencia. Con esto fue posible controlar el DPV como se muestra en la Figura 8. Donde se determinó una referencia de 1.06 kPa y se obtuvo una diferencia de 0.02kPa con respecto al valor deseado.

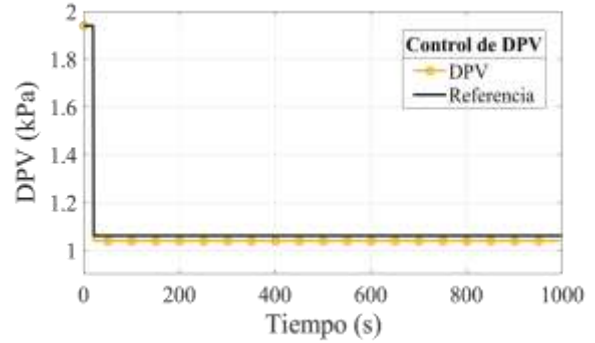


Figura 8. Control del DPV.

Posteriormente de haber evaluado los controles para el sistema de temperatura y humedad y obtener un valor de DPV en simulación, se realizó la implementación de los controles en el micro-invernadero.

4.2. Implementación del control

A partir del análisis matemático y diseño de los sistemas térmicos presentados en el punto 2 así como del diseño y evaluación de los algoritmos de control presentados en el punto 3 y 4.1, se realizó la implementación del control por LD para temperatura, RN para la humedad y se obtuvo el DPV controlado en el micro-invernadero. Se utilizó como medio de implementación la programación a bloques en LabVIEW con una placa Arduino Mega 2560 como tarjeta de adquisición de datos como se muestra en la Figura 9.

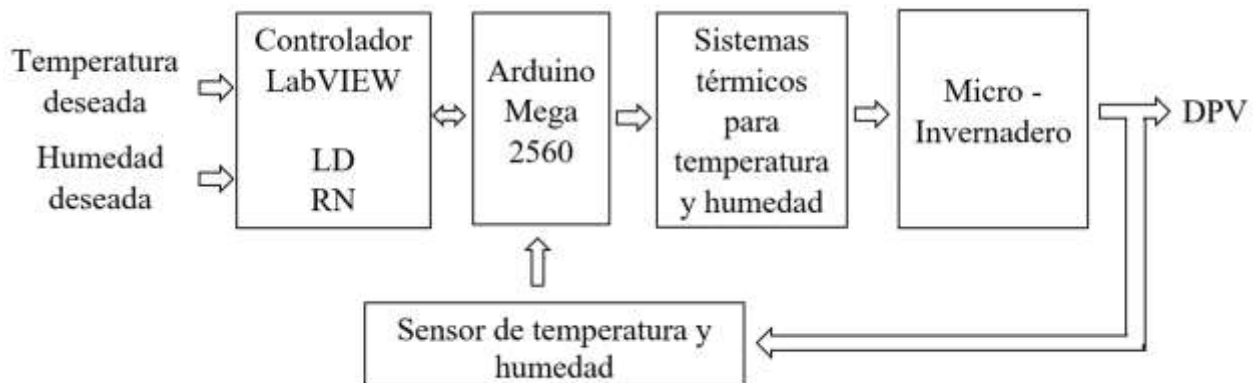


Figura 9. Diagrama general de implementación del control para DPV.

Para el sistema de temperatura se estableció una referencia de 30°C iniciando de 25°C y para el sistema de humedad se estableció una

referencia de 75% iniciando de 35%. Se realizaron los cálculos de los errores con la Ec. (13) y (14) para obtener el Error Medio

Absoluto (EMA) y el Error Estándar (EE). El control por LD para temperatura presentó un EE de $30.02 \pm 0.002^\circ\text{C}$ y un EMA de $30.02 \pm 0.08^\circ\text{C}$. El control por RN para humedad presentó un EE de $77 \pm 0.11\%$ y un EMA de $77 \pm 3.90\%$. Por lo tanto, para el control del DPV se determinó una referencia de 1.05kPa y se obtuvo un EE de $0.93 \pm 0.004\text{kPa}$ y un EMA de $0.93 \pm 0.09\text{kPa}$. En una investigación realizada por Shamshiri et al., (2017) se menciona que los valores adecuados de DPV para cualquier tipo de cultivo se encuentran en el rango de 0.5 kPa y 1.4 kPa.

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - x|}{N} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$EE = \frac{\sigma}{N} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

x_1 = Valor deseado

x = Valor medido

N = Número de muestras

σ = Desviación estándar

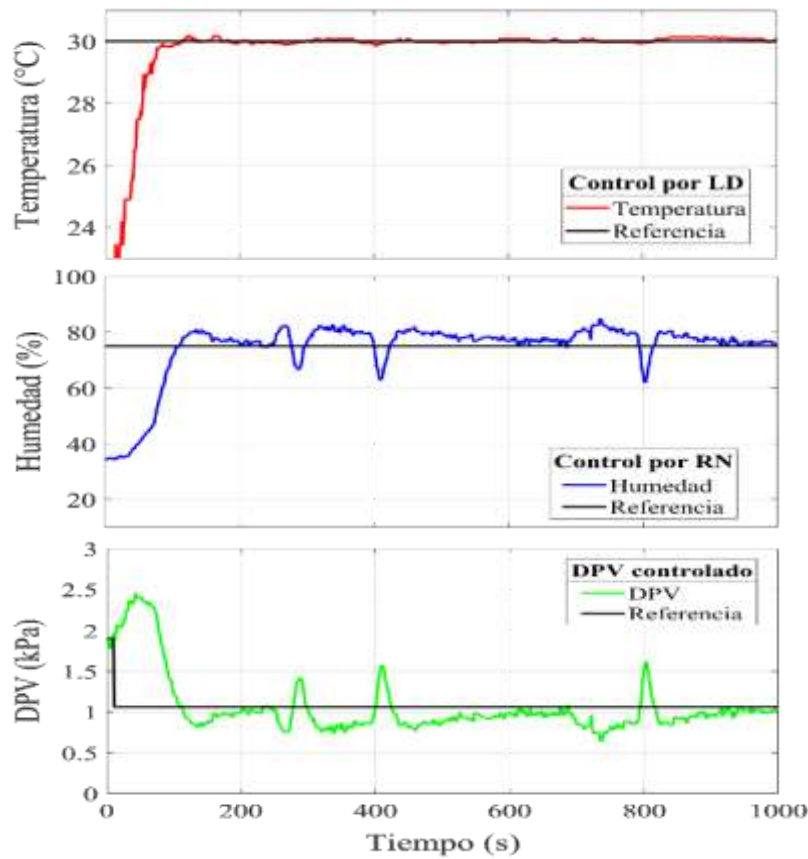


Figura 10. Implementación del control de temperatura y humedad para el DPV en el micro-invernadero.

En la Figura 10 se observa que el control por LD permite que la temperatura presente un comportamiento cercano a la referencia en el micro-invernadero. No presentó oscilaciones bruscas en el sistema, sin embargo, en algunos puntos de la gráfica, cuando la

temperatura se encuentra por debajo del valor deseado, la humedad es afectada. Esto se debe a que el sistema de calefacción implementado provoca caídas en los valores de humedad, pero el control por RN implementado en el sistema de humedad estabiliza el

comportamiento de esta variable. Por otra parte, el comportamiento del DPV se ve afectado por las caídas de la humedad, provocando un incremento en este valor. La humedad se ve relacionada directamente con la temperatura y el DPV con el comportamiento de la humedad. Al analizar la respuesta del DPV se puede observar que los errores calculados anteriormente indican que se encuentra cercano al valor deseado.

5. Conclusión

A diferencia de los trabajos anteriores, en la presente investigación se diseñaron dos sistemas termodinámicos para temperatura y humedad con el objetivo de controlar el DPV. Se realizó la evaluación de un control PID, LD y RN para cada variable donde se seleccionaron los que proporcionaron las mejores condiciones para la producción de germinados y posteriormente se realizó la implementación de los controles en el micro-invernadero.

El uso de controles inteligentes LD y RN que se evaluaron e implementaron para temperatura y humedad por medio de los sistemas térmicos propuestos en este trabajo, mantuvieron las condiciones adecuadas de DPV para la producción de germinados en un micro-invernadero. Los modelos matemáticos permitieron las pruebas en simulación de los controladores. De esta forma, mediante los modelos de temperatura y humedad fue posible observar el comportamiento de un DPV semejante al que se obtuvo en el micro-invernadero. Con estos resultados se propone una alternativa para la producción de germinados aplicando algoritmos de control y se consideran futuras aplicaciones de controles a nivel industrial en sistemas embebidos para la producción de alimentos.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por los apoyos otorgados para realizar este trabajo de investigación.

7. Referencias

1. C. Amitrano, C. Arena, Y. Rouphael, S. De Pascale y V. De Micco, "Vapour pressure deficit: The hidden driver behind plant morphofunctional traits in controlled environments", *Annals of Applied Biology*, (2019), pp. 1-13. DOI: 10.1111/aab.12544.
2. J. Calzada Riborosa, (2017), "Planeación agrícola nacional 2017-2030", SAGARPA.
3. J. Vargas, M. Palacios, J. Aguilar, J. Ocampo, P. Kreimer y G. Ortiz, "Technological innovation in a case of protected agriculture in Mexico", *Revista de Geografía Agrícola*, (2018), pp. 9-38. DOI: 10.5154/r.rga.2017.61.02.
4. J. García, J. Zarazúa, M. González, "Aprendizaje de variables ambientales de las condiciones de un micro invernadero en la producción de vegetales sobre un sistema hidropónico usando el enfoque de memorias asociativas", *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, (2016), vol. 2, no. 6, pp. 1-12.
5. R. Dorf & R. Bishop, (2005) "Sistemas de control moderno", Madrid, Pearson Educación.
6. H. Tangarife, S. Toro, C. Carmona, "Automated systems for water resources and environmental parameters control in greenhouses:

- applications and tendencias”, *Entre Ciencia e Ingeniería*, (2020), vol. 14, no. 27, pp. 91-98. <https://doi.org/10.31908/19098367.1796>.
7. K. Ogata, (2010), “Ingeniería de control moderna”, Madrid, Pearson Educación.
 8. M. Santos, “Un enfoque aplicado al control inteligente”, *Iberoamericana de automática industrial*, (2011), no. 8, pp. 283-296. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2011.09.016>.
 9. Benyezza H, Boudjemaa M, Bouhedda M, Abu Dura S., Cherif Z., “Fuzzy Greenhouse Temperature and Humidity”, *International Conference on Applied Smart Systems (ICASS)*, (2018), pp. 1-6.
 10. Yang L, Bo-Hao H, Hsu C, Sih-Li C, “Performance analysis of an earth–air heat exchanger integrated into an agricultural irrigation system for a greenhouse environmental temperature-control system”, *Energy and Buildings*, (2019), pp. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109381>
 11. Puspitasari W, Perdana R, Real-Time monitoring and automated control of greenhouse using wireless sensor network: design and implementation. *International seminar on research of information technology and intelligent systems (ISRITI)*, (2018), pp. 362-366. DOI: 10.1109/ISRITI.2018.8864377.
 12. Zarnescu A, Razvan U, Varzaru G, “Controlling the Temperature and Humidity in a Greenhouse”, *IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, (2019), pp. 168-171. DOI: 10.1109/SIITME47687.2019.8990886.
 13. Núñez R, Corzo C, González A. “Relative humidity control in agricultural greenhouse by Fuzzy self-tuning PI controllers”. *IAI*, (2018), pp. 1-13.
 14. Vega, F. Pérez y S. Jiménez, “Contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante en germinados de alfalfa (medicago sativa) y amaranto (amaranthus cruentus)”, *Congreso internacional de investigación e innovación*, (2018), pp. 8223-8234.
 15. R. Caroca, N. Zapata y M. Vargas, «Efecto de la temperatura sobre la germinación de cuatro genotipos de maní (*Arachis hypogaea* L.),» *chilean J. Agric. Anim. Sci., ex Agro-Ciencia*, 2016, vol. XXXII, no. 2., pp. 94-101, <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902016000200002>.
 16. D. Limwiwattana, K. Tongkhao y J. K. Na, “Effect of sprouting temperature and air relative humidity on metabolic profiles of sprouting black gram”, *Journal of Food Processing and Preservation*, (2016), vol. XL, pp. 306-315, <https://doi.org/10.1111/jfpp.12608>.
 17. D. Tobias, D. Abraham, “The transpiration of water at negative pressures in a synthetic tree”, *Nature*, (2008), vol. 455, pp. 208-212. <https://doi.org/10.1038/nature07226>.

18. Choaba N, Allouhi A, El Maakoul A, Kousksou T, Saadeddine S, Jamil A, “Review on greenhouse microclimate and application: Design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies” *Solar Energy*, (2019), vol. 191, pp. 109-137. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.042>.
19. Vassilyeva S, Kelina A, Kudinov Y, Pashchenko F, “Intelligent control systems”, *Procedia Computer Science*, (2017), pp. 623-628.
20. Ma J, Du Y, Qin L, Wu G, Wang D, “Hybrid control of greenhouse temperature system based on crop temperature integration theory” *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference*, (2017), pp. 2426-2431. DOI: 10.23919/ChiCC.2017.8027722.
21. Kazuhisa I, Yuma H, Multipoint-measurement multipoint-heating greenhouse temperature control with wooden pellet fuel using an adaptive model predictive control approach with a genetic algorithm. 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). (2017), pp. 54-59. DOI: 10.1109/MED.2017.7984095.
22. Murray F. “On the computation of saturation vapor pressure”, *Journal of applied meteorology*, (1966), pp. 203-204.
23. Shamshiri R, Che Man H, Zakaria A, Beveren P, Wan Ismail W, Ahmad D., “Membership function model for defining optimality of vapor pressure deficit in closed-field cultivation of tomato”, *International Conference on Agricultural and Food Engineering*, (2017), pp. 281-290, DOI: 10.17660/ActaHortic.2017.1152.38.
24. Cengel Y, Boles M, (2012), “*Termodinámica Mexico*”, D.F.: The McGraw-Hill Companies, Inc.
25. Velandia, J.B.; Quintana, J.S.C.; Ayala, S.C.V. Environment humidity and temperature prediction in agriculture using Mamdani inference systems. *Int. J. Electr. Comput. Eng.* 2021, 11, 3502–3509.
26. Izquierdo, S.; Izquierdo, L.R. Mamdani Fuzzy Systems for Modelling and Simulation: A Critical Assessment. *J. Artif. Soc. Soc. Simul.* 2018, 21.