

Construcción de una cámara de germinación para plántulas solanáceas

Construction of a Germination Chamber for Solanaceae Seedlings

JOSÉ ANTONIO TUMIALÁN BORJA*

CÉSAR HERNÁN RODRÍGUEZ GARAVITO**

MIGUEL ROJAS***

ALEJANDRA VILLAMIL****

RESUMEN

El artículo presenta el diseño, construcción y automatización de una cámara de germinación de semillas solanáceas, para la producción de plántulas en un tiempo corto. Se inició con el diseño y la construcción del prototipo experimental, con todos sus subsistemas. En seguida se obtuvo modelo de todo el sistema, que dio como resultado un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), donde se observó que las variables a controlar son la temperatura y la humedad relativa. A continuación se diseñó e implementó un sistema SCADA para realizar pruebas de funcionamiento en el interior de la cámara. La metodología de control seleccionada presentó resultados satisfactorios para un cambio de temperatura de 20 °C a 24 °C, en un tiempo de seis minutos, sujeta a perturbaciones ambientales. En la fase final, para validar el prototipo, se sembraron semillas de tomate Santa Clara; a partir de estas se obtuvo la germinación de 1800 plántulas en cuatro días y en un espacio de 1m³, con un porcentaje de germinación de un 100 %.

Palabras clave: cámara de germinación, control de procesos, plántulas solanáceas, SCADA.

ABSTRACT

The paper presents the design, construction and automation of a Solanaceae seed germination chamber for short-term production of seedlings. The project started with the design and production of the experimental prototype, with all of its subsystems. The entire system's model was obtained, which resulted in Multiple Input and Multiple Output (MIMO), where it was observed that the variables to be controlled are temperature and relative humidity. A SCADA system was then designed and implemented for operational testing inside the chamber. The control methodology selected showed satisfactory results for a change in temperature from 20 °C to 24 °C, within a period of six minutes, subject to environmental disturbances. In order to validate the prototype, Santa Clara tomato seeds were planted in the final stage, which resulted in the germination of 1800 seedlings in four days and within an area of 1m³, with a germination percentage of 100 %.

Keywords: Germination chamber, process control, Solanaceae seedlings, SCADA.

FECHA DE RECEPCIÓN: 17 DE AGOSTO DE 2011 • FECHA DE ACEPTACIÓN: 2 DE DICIEMBRE DE 2011

* Ingeniero en Ciencias de la Computación, MSc y PhD en Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Uberlândia (UFU), MG, Brasil. Docente investigador de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Salle. Correo electrónico: jtumialan@unisalle.edu.co

** Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. MSc en Ingeniería, Automatización Industrial de la Universidad Nacional de Colombia. Docente investigador de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Salle. Correo electrónico: cerodriguez@unisalle.edu.co

*** Ingeniero en Diseño y Automatización Electrónica de la Universidad de La Salle.

**** Ingeniera en Diseño y Automatización Electrónica de la Universidad de La Salle.

Introducción

Una de las causas por las que se presenta baja competitividad del agro colombiano, en pequeña y mediana escala, es por los cambios frecuentes y drásticos que sufren las condiciones ambientales a las cuales están sujetas las semillas, en su proceso de germinación y en las primeras semanas de crecimiento.

Debido a la necesidad de garantizar que un producto alimenticio presente condiciones de homogeneidad y crecimiento sistemático en un tiempo determinado, se construyó una cámara de germinación de plántulas solanáceas. Por medio de la innovación tecnológica en el área agroindustrial se busca la posibilidad de lograr la germinación de las plántulas solanáceas en menor tiempo, la implementación de esta clase de tecnologías permite ahorrar hasta un 60 % en tiempo.

Al tenerse en cuenta lo anterior, se puede observar que existen varias estrategias para reducir los tiempos de germinación y aumentar la uniformidad en los cultivos. Por ejemplo, el trabajo reportado en Remigio (2003), muestra un estudio del efecto de variar las condiciones de germinación que involucran humedad relativa (HR) y temperatura, para el tratamiento de enfermedades y la aceleración de la germinación de semillas. Para este caso específico el producto a trabajar son las semillas de tomate. Para las plántulas solanáceas, dichas estrategias consisten en garantizar ciertas condiciones ambientales, entre ellas se encuentra la humedad relativa (valor óptimo, superior al 70 %), la luminosidad (condiciones de oscuridad) y la temperatura (rango óptimo entre 20 °C y 24 °C). De esta manera, el cultivo de semillas puede tardar entre tres y cuatro días en germinar, proceso que en condiciones naturales tardaría de diez a doce días.

Existen varios procesos similares que han sido implementados en distintos lugares del mundo; por ejemplo, se construyeron dos cámaras de germinación a partir de las estructuras de dos incubadoras de huevos, donde se controlan variables de temperatura y humedad relativa (Rincones, 1989). Asimismo, se encuentra un proyecto en el que las semillas de especies de bosque chileno fueron sembradas en placas de Petri, sobre y bajo papel húmedo, dentro de la primera semana después de la cosecha (Figueroa, 2000). Allí se sembraron cincuenta semillas por placa con tres réplicas para cada especie. Las placas fueron incubadas en una cámara de germinación con un ciclo térmico de 20 °C a 10 °C, con un fotoperiodo de doce horas luz y una humedad relativa de aproximadamente el 70 %. Por último, se

encuentra un cultivo de orquídeas encubado bajo un fotoperiodo de dieciséis horas luz y ocho horas o de oscuridad a una temperatura de 24 ± 2 °C y una intensidad lumínica de 2000 lux (Ruiz, 2008). El objetivo fue establecer un protocolo efectivo para la germinación *in vitro* de semillas inmaduras de esta especie, así como conocer el efecto del estado de maduración de las cápsulas sobre su germinación.

Al partir de estos antecedentes se propone controlar de forma automática las condiciones ambientales a las que estará sometida una muestra de un cultivo de tomate, a escala de 1 a 0,35 del proyectado en la vereda de Mercadillo, en el municipio de Cáuzeza (Cundinamarca). El prototipo realizado cuenta con un control automático de humedad relativa y temperatura implementado en un PLC Siemens S7200, con conexión a un computador que realiza la función SCADA de la aplicación.

Prototipo experimental

El prototipo experimental mostrado en la figura 1 es básicamente un cuarto oscuro, compuesto por varios subsistemas: ventilación, calefacción, humidificación (nebulizador). El objetivo de la cámara es el de mantener los rangos de temperatura entre 20 °C a 24 °C, y humedad relativa superior al 70 %. Para poder realizar las pruebas de funcionalidad, el prototipo fue instrumentado con un transductor de temperatura y humedad (THD-R-C), tres resistencias eléctricas de 500 W, un

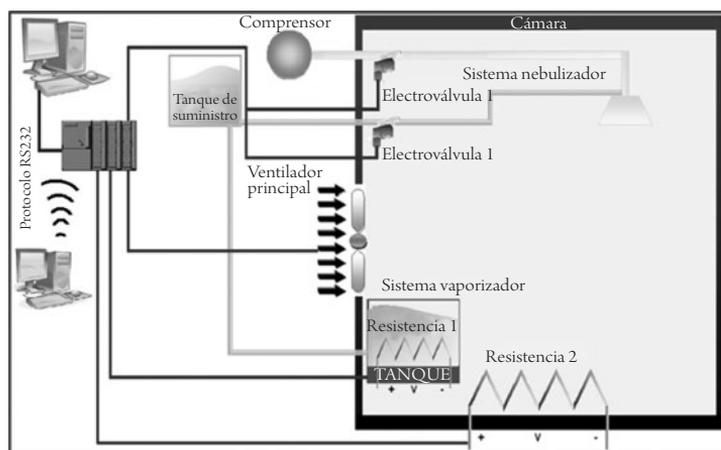


Figura 1. Sistema general de la cámara de germinación

Fuente: elaboración propia.

compresor de aire para suministro al sistema nebulizador, tres ventiladores que funcionan continuamente para hacer recircular el aire en el interior de la cámara y un módulo de control, a través de PLC (CPU 224XP), por su robustez contra ruido y facilidad de comunicación.

Subsistema-cámara

El subsistema-cámara corresponde al cuarto oscuro donde son almacenadas las semillas. Dicho recinto está construido en láminas de madera (formaleta) en las paredes externas, fibra de vidrio entre las paredes internas y las externas. Las paredes internas están fabricadas con distintos materiales según la ubicación y la operación de estas; el techo y las paredes frontales están recubiertas con plástico para proteger la fibra de vidrio de la humedad; las paredes laterales están recubiertas por láminas de aluminio que permiten la distribución de temperatura a lo largo de dichas caras; y por último, el piso es una lámina de madera (formaleta) que ayuda a soportar el peso de los equipos y componentes del sistema.

En el interior de la cámara se encuentran instalados una resistencia, tres ventiladores auxiliares, un ventilador principal, un sensor, un sistema vaporización y un sistema nebulizador. Adicional a esto, al momento de la puesta en marcha, las semillas son ubicadas en portasemillas con tierra, que a su vez se ubican en el interior de la cámara, dentro de un portabandejas, como se muestra en la figura 2.

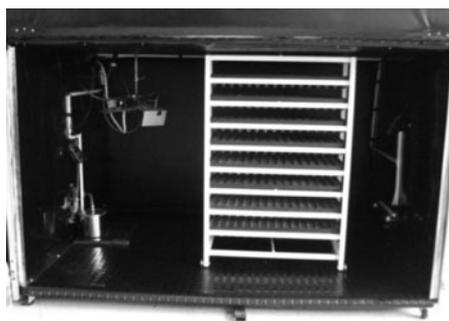


Figura 2. Interior de la cámara de germinación

Fuente: elaboración propia.

Subsistema-vaporizador

Este sistema se encarga de proporcionar vapor de agua, logrando con su activación el incremento de la temperatura y la humedad relativa en el interior de la cámara. En la figura 3 se observa el sistema vaporizador construido en un recipiente metálico que cuenta con una resistencia calentadora de agua en su interior. La tapa del recipiente contiene el sistema mecánico de control de nivel de agua, el cual regula la entrada de agua de acuerdo con la salida de esta, para así, proporcionalmente, suministrar desde el tanque principal la cantidad de agua correspondiente.

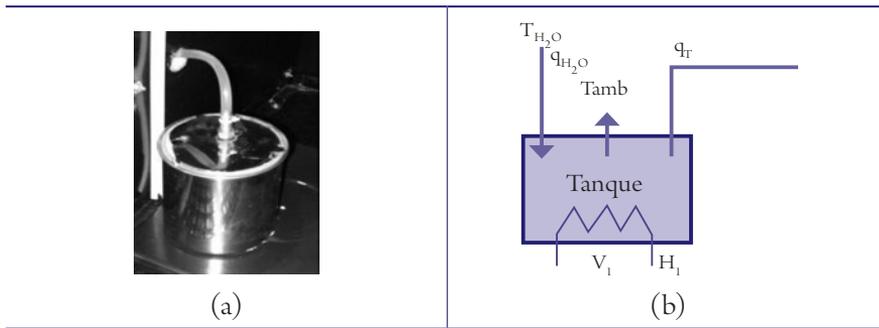


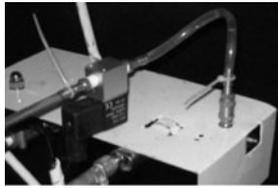
Figura 3. (a) Sistema vaporizado.

(b) Volumen de control del sistema vaporizador

Fuente: elaboración propia.

Subsistema-nebulizador

Este subsistema se encarga de incorporar agua pulverizada a temperatura ambiente en el interior de la cámara, con el fin de disminuir la temperatura y aumentar la humedad relativa; esto se logra utilizando un aerógrafo al que se le proporciona agua desde el tanque principal y aire desde un compresor, el paso de estos fluidos es controlado por dos electroválvulas. A continuación, en la figura 4, se presentan imágenes del sistema nebulizador, con sus respectivos actuadores.



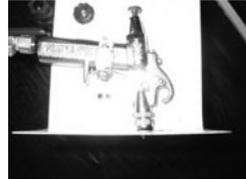
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4. (a) Sistema nebulizador, vista general. (b) Electroválvula paso de agua.

(c) Electroválvula paso de aire. (d) Aerógrafo

Fuente: elaboración propia.

Control y supervisión

La concepción de la metodología de control, para mantener las variables de temperatura y humedad relativa dentro de un rango especificado, parte del modelamiento del proceso de germinación. Para la simplificación del modelo se tuvieron en cuenta algunas consideraciones en la construcción de la cámara, como: garantizar un alto grado de hermeticidad, escogiendo materiales apropiados con un recubrimiento impermeabilizante negro que redujera la entrada de luz al volumen de trabajo. Asimismo, se debió realizar la HMI correspondiente, para garantizar la fácil y adecuada manipulación del sistema de control embebido dentro de un PLC. Para realizar el modelamiento matemático se partió de las siguientes hipótesis:

- Temperatura uniforme en cada uno de los tanques.
- Existe aislamiento perfecto en la cámara.
- Densidad y temperaturas constantes.

De acuerdo con las características del proceso se determinó que el sistema debe ser analizado como depósitos térmicos en serie, vaporizador y cámara. En la

figura 5 se representa el volumen de control de la cámara y el vaporizador; esto para obtener el modelo a través de ecuaciones diferenciales que representan la dinámica del sistema.

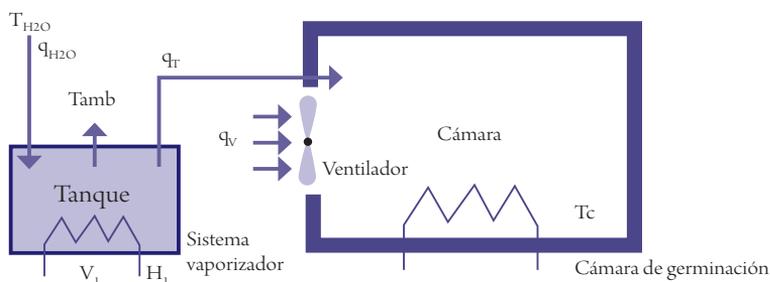


Figura 5. Diagrama general del sistema

Fuente: elaboración propia.

Modelamiento de la cámara

Para obtener el modelo de la cámara se tuvo en consideración las variables de entrada y salida del volumen de control, que es representado a través de la ecuación 1.

$$\frac{d(m_T, H_T)}{dt} = q_T \rho_{H2O} H_T - q_{H2O} \rho_{H2O} H_{H2O} + \frac{V_1^2}{R1} - \alpha(T_T - T_{amb}) \quad (1)$$

Donde:

$$H_T = C_p T_T m_T = A_T h_T \rho_{H2O}$$

H : entalpia [kJ/kg].

C_p : calor específico [kJ/kg-K].

T: temperatura [C].

A: área [m].

h: altura [m].

ρ : densidad [kg/m³].

q : flujo [m³/s].

V: voltaje [V].

R: resistencia [Ohm].

α : constante de conductividad [W/m-K].

Al sustituir las variables en la ecuación 1 se obtuvo la ecuación 2.

$$A_T h_T \frac{d(T_T)}{dt} = q_T (T_T - T_{H20}) + \frac{V_1^2}{R1 \rho_{H20} C_\rho} - \frac{\alpha (T_T - T_{amb})}{\rho_{H20} C_\rho} \quad (2)$$

En estado estacionario

$$\frac{\alpha}{\rho_{H20} C_\rho} = \frac{q_T (T_T - T_{H20})}{(T_T - T_{amb})} \quad (3)$$

Debido a que la mayoría de herramientas para el análisis de sistemas y diseño de sistemas de control requieren que el modelo sea lineal, es necesario linealizar el modelo.

Al linealizarse se obtuvo la ecuación 4.

$$\Delta T_T (\tau_1 s + 1) = K_1 \Delta V (s) + K_2 \Delta q_T (s) \quad (4)$$

De acuerdo con la ecuación anterior se obtiene que los valores del Tao y de las constantes para la cámara están definidos por las siguientes variables:

$$\tau_1 = \frac{A_T h_T}{\left(\frac{\alpha}{\rho_{H20} C_\rho} + q_T \right)}$$

$$K_1 = \frac{2V_1}{R1 \rho_{H20} C_\rho \left(\frac{\alpha}{\rho_{H20} C_\rho} + q_T \right)}$$

$$K_2 = \frac{(T_T - T_{H20})}{\left(\frac{\alpha}{\rho_{H20} C_\rho} + q_T \right)}$$

Modelamiento vaporizador

Para obtener el modelo del vaporizador se tuvo en consideración las variables de entrada y salida del subsistema, el cual puede ser representado a través de la ecuación 5.

$$\frac{d(m_C, H_C)}{dt} = q_T \rho_{H20} H_T - q_V \rho_{amb} - q_V \rho_{aire} H_C + \frac{V_2^2}{R_2} - q_T \rho_{H20} H_C \quad (5)$$

Donde:

$$H_C = C_\rho T_C m_C = A_C h_C \rho_{H2O}$$

Al reemplazarse las variables se obtiene la ecuación 6.

$$A_C h_C \frac{d(T_C)}{dt} = q_T T_T - q_V \frac{\rho_{aire} C_\rho}{\rho_{H2O} C_\rho} T_{amb} - q_V \frac{\rho_{aire} C_\rho}{\rho_{H2O} C_\rho} T_C + \frac{V_2^2}{\rho_{H2O} C_\rho R2} - q_T T_C \quad (6)$$

En estado estacionario tenemos

$$\frac{q_V \rho_{aire} C_{paire}}{\rho_{H2O} C_{\rho H2O}} = \frac{q_T T_T}{T_C}$$

Al linealizarse la ecuación 5 se obtuvo la ecuación 7.

$$\Delta T_C (\tau_2 s + 1) = K_3 \Delta T_T (s) + K_4 \Delta q_T (s) + K_5 \Delta q_V (s) + K_6 \Delta V_2 (s) \quad (7)$$

De acuerdo con la ecuación anterior se obtuvo que los valores del Tao y de las constantes para el vaporizador están definidos por las siguientes variables:

$$\tau_2 = \frac{A_C h_C}{\left(q_V \frac{\rho_{aire} C_{paire}}{\rho_{H2O} C_{\rho H2O}} + q_T \right)}$$

$$K_3 = \frac{q_T}{\left(q_V \frac{\rho_{aire} C_{paire}}{\rho_{H2O} C_{\rho H2O}} + q_T \right)}$$

$$K_4 = \frac{(T_{T0} - T_{C0})}{\left(q_V \frac{\rho_{aire} C_{paire}}{\rho_{H2O} C_{\rho H2O}} + q_T \right)}$$

$$K_5 = \frac{(-T_{amb} + T_{C0}) \frac{q_V \rho_{aire} C_\rho}{\rho_{H2O} C_\rho} \Delta q_V}{\left(q_V \frac{\rho_{aire} C_{paire}}{\rho_{H2O} C_{\rho H2O}} + q_T \right)}$$

$$K_6 = \frac{2V_2}{\rho_{H2O} C_\rho CR * \left(q_V \frac{\rho_{aire} C_{paire}}{\rho_{H2O} C_{\rho H2O}} + q_T \right)}$$

En la figura 6 se observa la representación del sistema completo a través de diagramas de bloques.

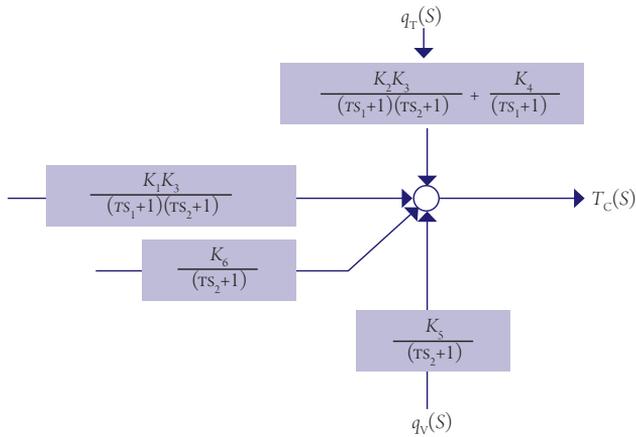


Figura 6. Diagrama de bloques del sistema

Fuente: elaboración propia.

Los valores y las unidades relacionadas con cada una de las constantes que aparecen en el modelo de la figura 6, se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Tabla de constantes del modelo de la cámara de germinación

$k1 = 8,091 \% [K \cdot h / m^3]$	Constante 1 de la cámara
$k2 = 0,0002839 \% [Volt \cdot K \cdot h / Ohm \cdot kJ]$	Constante 2 de la cámara
$k3 = 0,4484 \%$	Constante 3 de la cámara
$k4 = 6,668 \% [K \cdot h / m^3]$	Constante 4 de la cámara
$k5 = 0,005964 \% [K \cdot h / m^3]$	Constante 5 de la cámara
$k6 = 0,0006451 \% [Volt \cdot K \cdot h / Ohm \cdot kJ]$	Constante 6 de la cámara
$\tau_{o1} = 4,697 \% [m^3 / h]$	Constante de tiempo 1 de la cámara
$\tau_{o2} = 4,651 \% [m^3 / h]$	Constante de tiempo 2 de la cámara

Fuente: elaboración propia.

V_1 y V_2 corresponden a las dos entradas de voltaje que accionan las resistencias, que evaporan el agua que hay dentro del tanque de evaporación, y aumenta la temperatura al interior de la cámara, respectivamente. Estas señales se asocian a perturbaciones del sistema, ya que su trabajo a lo largo del proceso no es continuo, su actuación en el proceso es encendido-apagado. El sistema cuenta con una perturbación adicional q_p , que también corresponde a un accionamiento encendido-apagado, que permite el paso de agua a los sistemas vaporizador y nebulizador. Por ende, el control será aplicado sobre el ventilador, manipulando el flujo de aire, a través de su velocidad de giro.

Para seleccionar la mejor estrategia de control se realizaron pruebas con diferentes métodos y se escogió el más eficiente. En la figura 7 se puede observar la comparación de la aplicación con algunos de los métodos de control como: PID (Ziegler Nichols en lazo abierto), compensador basado en RLOCUS y compensador por cancelación de polos.

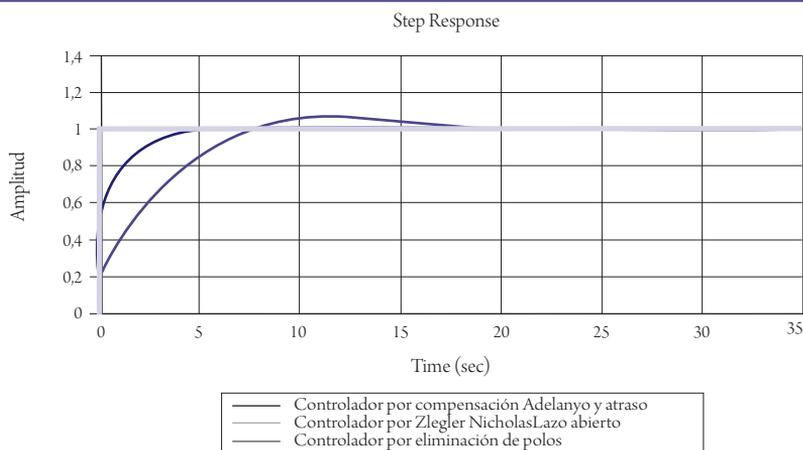


Figura 7. Respuesta al impulso de la función de transferencia del sistema, en lazo cerrado para tres tipos diferentes de controlador

Fuente: elaboración propia.

Al analizar las respuestas de los controladores se seleccionó el compensador por cancelación de polos puesto que presentaba menor tiempo de establecimiento y menor sobreimpulso. En la figura 8 se expone el diagrama de control del sistema retroalimentado a través del diagrama de bloque. También se observa el diagrama de control, con el que el objetivo de controlar la temperatura al interior de la cámara, $T_c(s)$ ($^{\circ}K$).

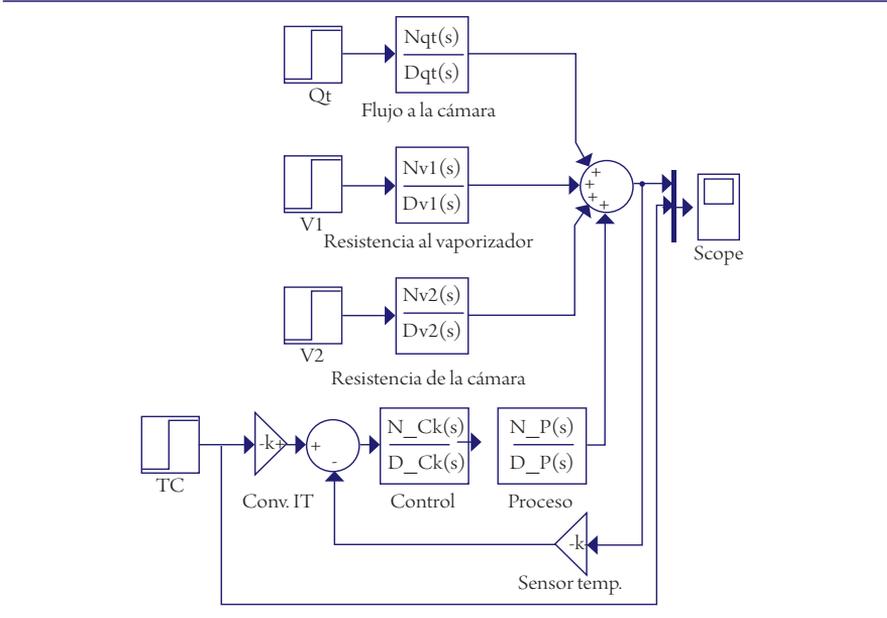


Figura 8. Esquema de control de la cámara de germinación

Fuente: elaboración propia.

En la figura 9 se observa el tiempo de respuesta del sistema a la acción del controlador, partiendo de una temperatura inicial de 0 °K a 300 °K, en un tiempo de respuesta de acomodación de minutos.

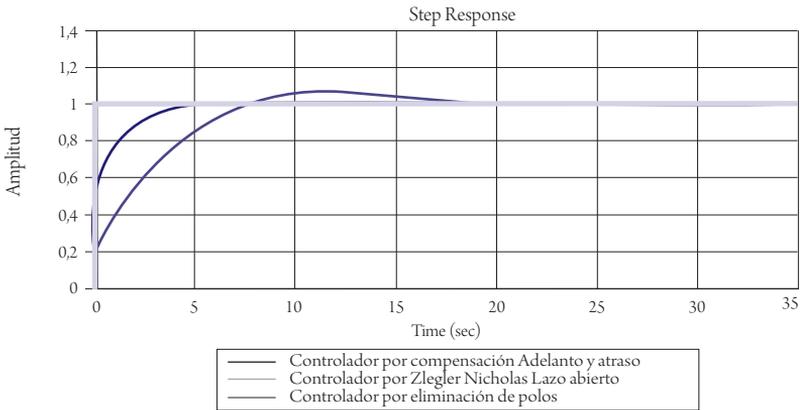


Figura 9. Respuesta de la acción de control al interior de la cámara

Fuente: elaboración propia.

Los valores obtenidos para el controlador (ganancia-polo-integrador), más la estructura lógica de funcionamiento fueron embebidos en un PLC Siemens S7200. El código implementado corresponde al diagrama de flujo que aparece en la figura 10.

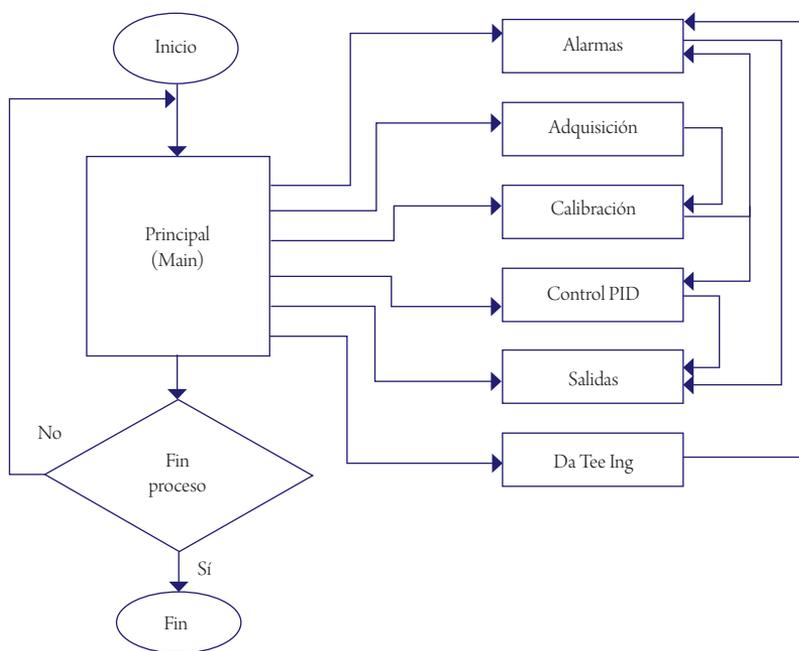


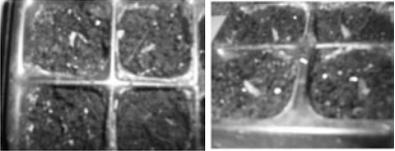
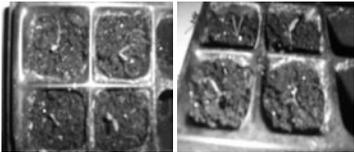
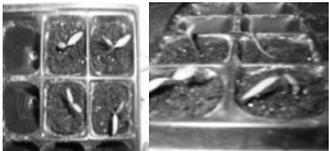
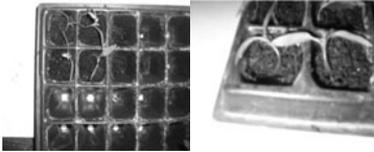
Figura 10. Diagrama de flujo del programa principal del PLC

Fuente: elaboración propia.

Pruebas y análisis de resultados

Para corroborar el buen funcionamiento del sistema fue necesario realizar un cultivo de semillas de tomate, que para el caso fue tomate Santa Clara. A lo largo de la ejecución del proceso se realizaron revisiones periódicas, en las que se hizo un registro fotográfico para visualizar el avance del crecimiento de la plántula. En la tabla 2 se presentan las imágenes captadas.

Tabla 2. Relación de crecimiento en siembra de las semillas de tomate

<p>PRIMER DÍA</p>	
<p>SEGUNDO DÍA</p>	
<p>TERCER DÍA</p>	
<p>CUARTO DÍA</p>	

Fuente: elaboración propia.

Para la obtener estos resultados se manejaron los siguientes rangos de referencias y alarmas:

- Set point temperatura high: 24 [C]
- Set point temperatura: 22 [C]
- Set point temperatura low: 20 [C]
- Set point humedad relativa: 80 [-]
- Temperatura alta: 26 [C]
- Temperatura baja: 18 [C]
- Humedad relativa baja: 75 [-]

A continuación se muestran las figuras 11, 12 y 13 que representan la evolución en el tiempo de la temperatura, la humedad relativa y el control de velocidad a lo largo de una hora.



(a)



(b)

Figura 11. Histórico de temperatura: (a) Treinta minutos y (b) Sesenta minutos

Fuente: elaboración propia.



(a)

Continúa



(b)

Figura 12. Histórico de humedad relativa: (a) Treinta minutos y (b) Sesenta minutos

Fuente: elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 13. Histórico de consigna de velocidad: (a) Treinta minutos y (b) Sesenta minutos

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

El proceso de germinación de las plántulas solanáceas se ve completamente beneficiado al garantizar un ambiente homogéneo y no variable, por un tiempo de 96 horas, debido a que se evita la muerte de las semillas por choque térmico producido entre las temperaturas día-noche en espacios abiertos, que equivalen casi a un 40 % de la mortalidad de estas plántulas alrededor del mundo.

Debido a la velocidad de respuesta característica de los sistemas, la implementación en un PLC es adecuada, puesto que la estabilización se alcanza en un tiempo considerablemente alto, del orden de fracciones de hora.

La acción que cumple el ventilador principal es la de regular la temperatura y la humedad relativa existentes dentro de la cámara. Al presentarse una elevación de temperatura, el ventilador actuará tratando de minimizar el sobrepaso de temperatura, dando como consecuencia una pérdida más rápida de humedad relativa.

El trabajo realizado por los ventiladores auxiliares permite la recirculación del aire en el interior de la cámara, para así poder ofrecer mayor uniformidad, es por esto que la temperatura puede disminuir rápidamente, ya que de otra forma el aire quedaría circulando dentro de la cámara, causando un Tao infinito que llevaría a la inestabilidad de la planta.

La variable controlada en el sistema, en este caso, la temperatura de la cámara de germinación, presentó una respuesta de seis minutos para alcanzar la temperatura de referencia de 300 °K, bajo condiciones del 10 % de $q_r(S)$ sobre el valor máximo de 4.572 [m³/h] y V1 y V2 de 220 [V].

Aunque la cámara de germinación mejoró la homogeneidad, en el crecimiento de las semillas se observó una pequeña variación a causa de las características genéticas de la semilla.

Referencias

Andre Da Cunha, R (2008). *Análise Implementação de Algoritmos de Sintonia de Controladores PID para Sistemas com Grande Atraso de Tempo*. Uniuersidad Federal del Espiritu Santo.

- Bueche, F. (1988). *Fundamentos de Física I* (3ª. ed.). México, D. F.: MacGraw-Hill.
- Figueroa, J. (2000). Aspectos ecológicos de la germinación en especies del bosque templado-húmedo del sur de Chile. *Chloris Chilensis*, 3(2).
- Mandado, P. (2008). *Autómatas programables: métodos, conceptos tecnológicos y ejemplos prácticos*. México, D. F.: Cengagelearnig.
- Osorio, D. L. (2003). *Volvamos al campo: producción de pimentón, tomate y lechuga en hidroponicos*. Bogotá: Grupo Editorial Latino.
- Remigio, A.; Guzman-Plazola, R.; Michael Davis y James, J. (2003). Effects of relative humidity and high temperature on spore germination and evelopment of tomato powdery mildew (*Leveillulataurica*). *Original Research Article Crop Protection*, 22(10), 1157-1168.
- Rincones, C.; Manzano, A. y Delgado A. (1989). Adaptación de incubadoras de huevos como cámara de germinación para semilla sexual de caña de azúcar. *Caña de Azúcar*, 7(2), 69-76.
- Rodríguez, A. (s. f.). *Sistemas SCADA* (2ª. ed.). Barcelona: Alfaomega - Enciclopedia Práctica de la Agricultura y la Ganadería. Barcelona: Océano.
- Ruiz, B; Laguna, C, e Iglesias, A. (2008). Germinación in Vitro de Semillas de *Encyclia Adenocaula* (La Llave y Lex.) Schltr (Orchidaceae). *Phyton B. Aires*, jan./dez, 77, 203-215.