

Gestión del ambiente del invernadero mediante un microcontrolador electrónico para el cultivo de vegetales

Managing the greenhouse environment by an electronic microcontroller to cultivate vegetables

BARON, Julio¹
VANEGAS, Sebastián C.²
ROCHA, Camlo E.³

Resumen

Este documento presenta los resultados de un prototipo a pequeña escala de un invernadero soportado por dispositivos electrónicos y elaborado con materiales reciclables. El modelo propuesto tiene como objetivo principal establecer un prototipo de ambiente controlado mediante el uso de sensores y actuadores gestionados por un microcontrolador para regular condiciones climatológicas como temperatura y humedad tanto ambiental como de suelo, aplicado a un cultivo piloto de rábano común y habichuela. Se describen y comparan los resultados obtenidos en siembra convencional y utilizando el prototipo implementado.

Palabras clave: agricultura, automatización, control, invernadero, microcontrolador

Abstract

This document presents the results of a small-scale prototype of a greenhouse supported by electronic devices and made with recyclable materials. The main objective of the proposed model is to establish a prototype of a controlled environment through the use of sensors and actuators managed by a microcontroller to regulate weather conditions such as temperature and both environmental and soil moisture, applied to pilot crops of common radish and kidney beans. The results obtained in conventional sowing and using the prototype implemented are described and compared.

Key words: agriculture, automation, control, greenhouse, microcontroller

¹ PhD en Ingeniería Informática, Director grupo de investigación INTECSE, Facultad de Ingeniería. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. –Decano. República de Colombia. jbaron@udistrital.edu.co

² Estudiante de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Grupo de Investigación INTECSE. República de Colombia. scvanegasa@correo.udistrital.edu.co

³ Estudiante de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Grupo de Investigación INTECSE. República de Colombia. cerochac@correo.udistrital.edu.co

1. Introducción

En el medio urbano se presentan limitaciones de tiempo para dedicar al cultivo de alimentos, lo que hace que las personas adquieran la totalidad de los mismos en el mercado. Por ello, se busca reducir los actuales niveles de intervención humana en el proceso de desarrollo de cultivos (Dan, Jianmei, Yang & Jianqiu, 2016), trabajando en la automatización de las actividades relacionadas con el mismo en un invernadero mediante la incorporación de dispositivos electrónicos de manera modular y gestionada por un microcontrolador (Teslyuk, Denysyuk, Kernyskyy & Teslyuk, 2015; Ullas, Saiprasad, Shrivankumar & Veerabhadra, 2016), como un mecanismo que permite la incorporación dinámica de información del cultivo (Kang y otros, 2018).

La automatización brinda las herramientas necesarias para disminuir el tiempo de dedicación que se debe invertir en los correspondientes cuidados que requiere un cultivo; sin embargo, desafortunadamente, muchos agricultores todavía usan los métodos tradicionales de siembra, lo que resulta en un bajo rendimiento de cosechas (Kang y otros, 2018). Por lo tanto, es necesario implementar la ciencia y tecnologías modernas en el sector agrícola para aumentar su rendimiento (Gondchawar & Kawitkar, 2016), se estima que para el año 2050 la agricultura convencional sea obsoleta, dando paso al desarrollo de cultivos automatizados basados en la ciencia y la tecnología (Aju, Akhil, Ganga & Tony, 2014).

Lo anterior se logra empleando técnicas abordadas desde la perspectiva de la teoría de control, la cual es una rama interdisciplinaria de la ingeniería y las matemáticas que se ocupa del comportamiento de los sistemas dinámicos (Santos, 2013). Cuando una o más variables de salida de un sistema necesitan seguir una determinada referencia deseada a lo largo del tiempo, un controlador gestiona las entradas a un sistema para obtener el efecto deseado en la salida del sistema (Santos, 2013). El control es importante para mantener las variables en el rango deseado durante periodos prolongados de tiempo. Por ejemplo, un invernadero controlado artificialmente permite gestionar los parámetros micro climáticos que determinan el rendimiento del cultivo, los cuales se examinan y controlan continuamente para garantizar que se cree un entorno adecuado (Siddiqui y otros, 2017).

Además del monitoreo de los factores ambientales, hay una serie de otros factores que afectan la productividad de un cultivo en gran medida. Para proporcionar soluciones a todos estos problemas, es necesario desarrollar un sistema integrado que se encargue de todos los factores que afectan la productividad en todas las etapas: cultivo, recolección y almacenamiento post cosecha (Gondchawar & Kawitkar, 2016).

Teniendo en cuenta la necesidad de social de fomentar la agricultura urbana y la falta de automatización de actividades relacionadas con el cuidado y desarrollo de los cultivos, se propuso trabajar en un cultivo automatizado bajo un ambiente controlado, realizado con materiales reciclables, el cual puede ser ubicado en una vivienda dentro de la ciudad. Para lograr este objetivo, se estableció un prototipo de ambiente controlado mediante el uso de sensores y actuadores gestionados por un microcontrolador para la siembra de vegetales de ciclo corto, basado en la configuración propuesta por Ullas, Saiprasad, Shrivankumar & Veerabhadra (2016). Además, se describen y comparan los resultados obtenidos en el ambiente diseñado con los resultados obtenidos mediante siembra convencional.

2. Metodología

2.1. Subsistemas

La técnica metodológica aplicada se basó en la definición de subsistemas interconectados. Para su diseño y construcción se trabajó mediante métodos basados en componentes, los cuales, después de un diseño general del sistema, se detallan y construyen en forma modular, corrigiendo los errores y ampliando sus funcionalidades de manera iterativa incremental, con lo cual aumenta el nivel de precisión en las respuestas de los subsistemas y a la vez crece el número de funcionalidades disponibles (Sommerville, Campos, & Fuenlabrada 2011).

Para esto se analiza en primer lugar la etapa de cultivo, la cual se abordará desde los factores de humedad y temperatura, que afectan en mayor medida la misma, y además se brinda una opción de aislamiento al diseñar un ambiente controlado similar a un invernadero. Para el desarrollo del prototipo se desarrollaron los siguientes subsistemas a trabajar:

Regulación de la humedad del suelo

Para el cuidado del cultivo se requiere verificar la humedad del suelo y agregar agua y fertilizante cuando sea necesario. Para ello se eligen actuadores y sensores que permitan controlar la humedad del suelo por medio de un sistema de riego.

Regulación de la temperatura

La temperatura en el invernadero es una variable fundamental que debe ser mantenida de manera constante. Esto se logra mediante un ambiente hermético, una fuente de calor y un disipador de temperatura, todo lo cual requiere un conjunto de sensores que permitan recolectar los valores de temperatura del entorno controlado.

2.2. Construcción de los subsistemas

En primer lugar, se analizaron cada uno de los subsistemas y se realizó un diseño del módulo de regulación de temperatura, debido al grado de complejidad que presenta, utilizando el programa Proteus 8 Professional de Labcenter Electronics Ltd.

Se modeló el funcionamiento de cada uno de los subsistemas, por medio, de la herramienta Simulink encontrada en el software Matlab 2019^a del laboratorio MathWorks.

Se analizó cada uno de los sensores que conforman el subsistema y se realizó una prueba de estos, revisando que los valores fueran típicos o estuvieran acordes a las especificaciones técnicas del sensor.

Posteriormente, se probaron los actuadores que conforman el subsistema y se verificó que cumplieran las funciones previamente definidas.

La comunicación entre el sensor y el actuador se verificó mediante el cumplimiento de los objetivos especificados para el subsistema. Posteriormente, se realizaron pruebas de integración entre el sensor y el actuador, comprobando que cumplieran con los parámetros establecidos y que las acciones se ejecutaran acorde a los datos censados.

El subsistema se integró al sistema general mediante el uso de un microcontrolador que administra las interacciones entre los subsistemas y cada uno de sus componentes, evaluando si era necesario mejorar el desarrollo obtenido y verificando que se cumplieran las funcionalidades del subsistema. Cuando fue necesario agregar o modificar algún subsistema, se procedió de la manera descrita anteriormente.

2.3. Caracterización de los Componentes

Con base en el análisis y el diseño realizado se generó un modelo permitiendo previsualizar el prototipo, por lo cual, se propendió al uso de materiales reciclables para desarrollar la estructura del mismo. En cuanto al funcionamiento del prototipo se establecieron los siguientes sensores y actuadores:

- Microcontrolador: debe tener una comunicación con un dispositivo de acceso táctil que facilite la administración del sistema por parte de los usuarios y contar con un número de puertos suficientes para los diversos actuadores y sensores de cada subsistema.
- Módulo de temperatura ambiente: se debe medir la temperatura y la humedad fácilmente; la temperatura debe estar comprendida en un rango entre 10 a $40\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$, según los requerimientos de los cultivos a estudiar.
- Ventilador: con base en el diseño desarrollado en Venlo-type de un invernadero (Trejo-Perea, Herrera-Ruiz, Rios-Moreno, Castañeda Miranda & Rivasaraiza, 2009), se requiere un ventilador que ocupe un cuarto de la cara visible del prototipo.
- Resistencia eléctrica: se requiere realizar cambios de temperatura en relación con el ambiente, para lo cual se selecciona una fuente de calor basada en una resistencia eléctrica que permite cambios rápidos de temperatura.
- Sensor de humedad de suelo: para garantizar que el suelo posea la humedad requerida por el cultivo, es necesario obtener sus niveles en el suelo con regularidad; dadas las condiciones inherentes del terreno que pueden afectar la lectura del ambiente descritas por Somov y otros (2018), es necesario que el sensor presente características de resistencia frente a factores como el polvo o la oxidación.
- Electroválvula: el paso del agua y otros fluidos a través de un sistema hidráulico debe ser controlado de manera ágil y considerando un flujo constante y suficiente para irrigar la superficie del invernadero.
- Sistema de riego: se deben variar los valores de humedad del suelo según sea la necesidad de cada cultivo, por lo tanto, se debe tener un sistema de riego de la zona cultivada.
- Monitoreo y ajuste de variables: para permitir la observación del estado de las variables y facilitar el cambio de los parámetros de control por parte de usuarios no expertos en dispositivos electrónicos, se debe contar con un componente que permita gráficamente visualizar y modificar los subsistemas.

2.4. Cultivos estudiados

Los cultivos estudiados fueron el Rabano Cherry Belle y la Habichuela Blue Lake Stringless variedad S-7, los cuales se encuentra sobre todo en las regiones meridionales del Mediterráneo (FAO Dirección de Producción y Protección Vegetal, 2002) y se tiene un acceso sencillo a sus semillas.

Los valores requeridos para cada uno de los subsistemas, de acuerdo con los cultivos estudiados son:

- Humedad: los valores esperados de humedad del suelo para el cultivo de rábano y de habichuela deben estar entre 60 % y 65 % de la capacidad de campo durante el ciclo vegetativo.
- Temperatura: la temperatura óptima de germinación del rábano está entre 20 y 25 °C y para la habichuela entre 20 y 30 °C .

Esta información es obtenida directamente desde el empaque de las semillas y contrastada con la obtenida en la FAO (2002).

La cantidad de cultivos analizados fueron 8, para el rábano, se realizó el monitoreo y control a dos cultivos de rábanos en ambientes independientes, uno en una maceta mediante cuidados convencionales y el segundo en el ambiente controlado (prototipo). Por otra parte, para la habichuela, se realizó el monitoreo y control a seis cultivos de habichuelas en ambientes independientes; cinco fueron encargados a diferentes miembros de la comunidad que se ofrecieron como voluntarios para desarrollar el cultivo mediante cuidados convencionales y un sexto cultivo en el ambiente controlado (prototipo).

2.5. Análisis estadístico

2.5.1. Longitud del tallo

Para cada uno de los cultivos escogidos se compararon la longitud del tallo del cultivo en estudio y el tiempo transcurrido, como funciones que representan el comportamiento del cultivo en un ambiente específico (en primer lugar, en un entorno controlado y, en segundo, en condiciones ambientales normales); posteriormente, se realizó la comparación gráfica de los valores de las funciones. Además, se obtuvo la función con mejor rendimiento mediante comparación aritmética y el uso del concepto de límite (Larson, Hostetler & Edwards, 2006).

2.5.2. Tiempo de dedicación

En cada uno de los cultivos escogidos se realizó un registro de las horas de dedicación semanal teniendo en cuenta dos tipos de desarrollos: mediante cuidados convencionales y en el ambiente controlado (prototipo); consecuentemente, se realizó la comparación y análisis de los valores totales obtenidos.

2.5.2. Agua utilizada

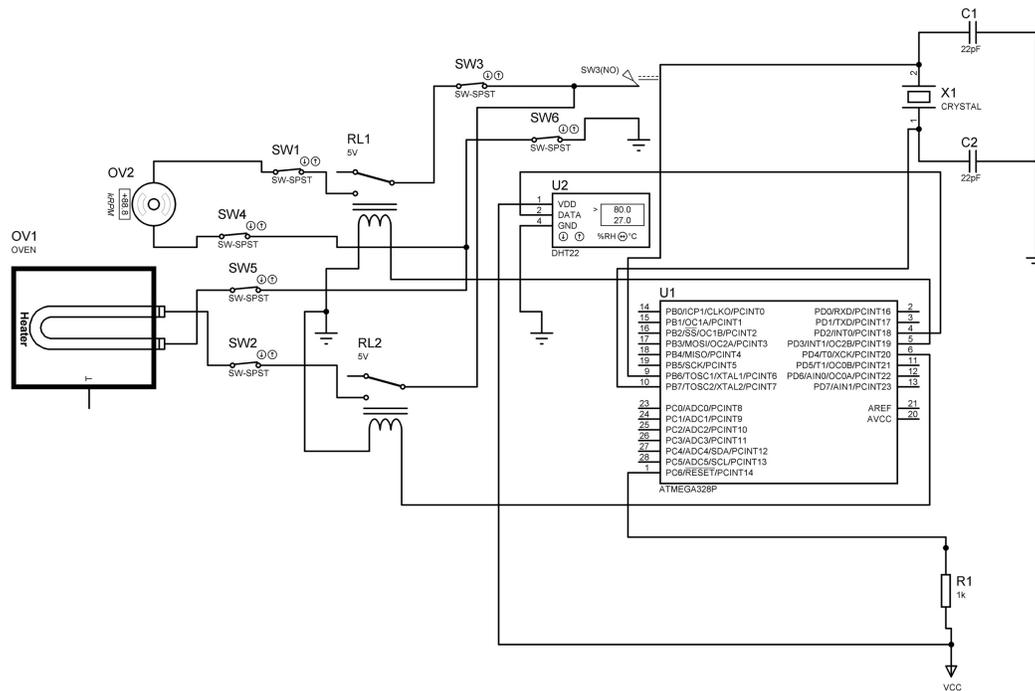
En cada uno de los cultivos escogidos se realizó un registro de los litros de agua que consume el subsistema de regulación de la humedad del suelo, considerando dos tipos de desarrollos: mediante cuidados convencionales y en el ambiente controlado (prototipo); finalmente, se realizó la comparación y análisis de los valores totales obtenidos, para obtener el promedio diario del consumo de agua.

3. Resultados

3.1. Diseño del prototipo

Principalmente se realizó el diseño para el subsistema de temperatura, comprendido por un microcontrolador (U1) como eje central, el cual, se encarga de analizar la información brindada por un sensor de temperatura (U2), dependiendo del valor obtenido el microcontrolador activa mediante un relé (RL1), un disipador (OV2); o el relé (RL2), una resistencia eléctrica (OV1), como se observa en la figura 1.

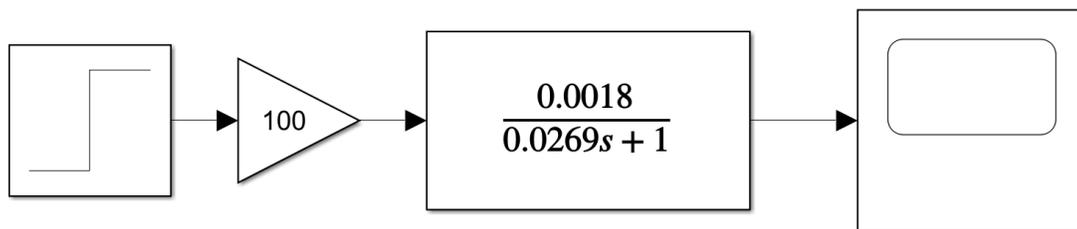
figura 1
 Diseño del módulo de regulación de la temperatura
 utilizando la herramienta Proteus 8 Professional®.



Elaboración propia

Para el subsistema de temperatura se observa la función de transferencia del mismo en la figura 2, conformada por un $\tau = 0.0269$ (Tau) y un valor de estabilización en 0.018. Para observar su comportamiento se utilizó una entrada paso con valor inicial de 0, junto a una ganancia de 100 unidades.

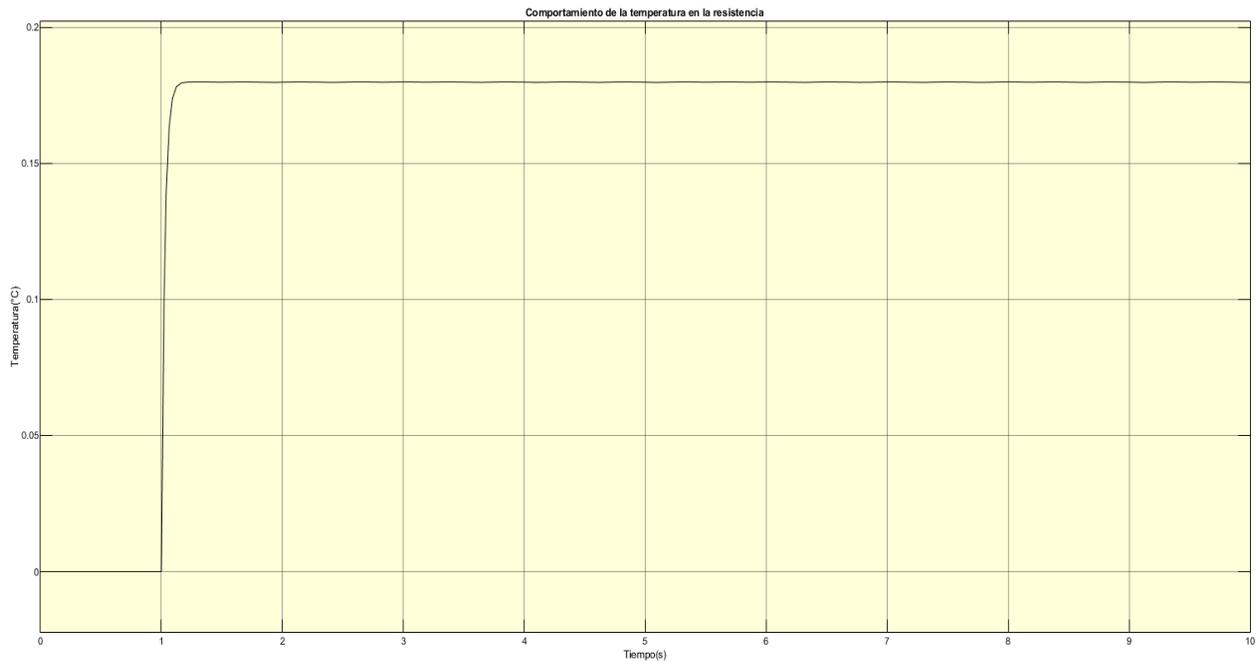
figura 2
 Modelado del comportamiento del subsistema de temperatura
 utilizando la herramienta Simulink de Matlab 2019ª



Elaboración propia.

En la figura 3 se presenta la respuesta para el actuador (resistencia eléctrica), según la entrada paso y la ganancia. Se observa que la temperatura se estabiliza en un valor de 18°C, en un tiempo cercano a 1 segundo para una señal paso con valor de 1.

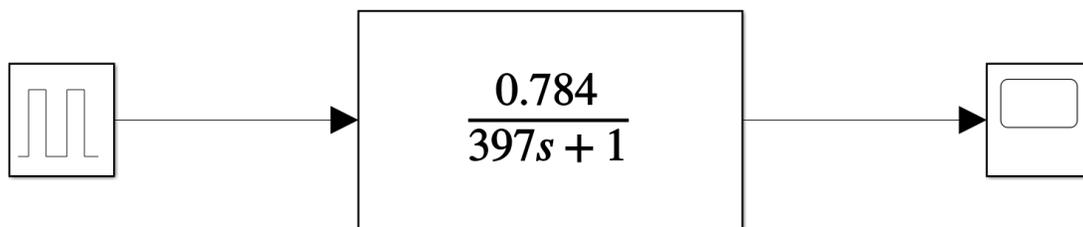
figura 3
 Respuesta del comportamiento de la temperatura
 para la resistencia eléctrica en el tiempo



Elaboración propia

La función de transferencia del subsistema hidráulico a partir de un tanque de agua como fuente limitada se presenta en la figura 4, la cual, es compuesta por un $\tau = 397$ (Tau) y un valor de estabilización en 0.784. Para observar su comportamiento se utilizó una entrada tipo pulso.

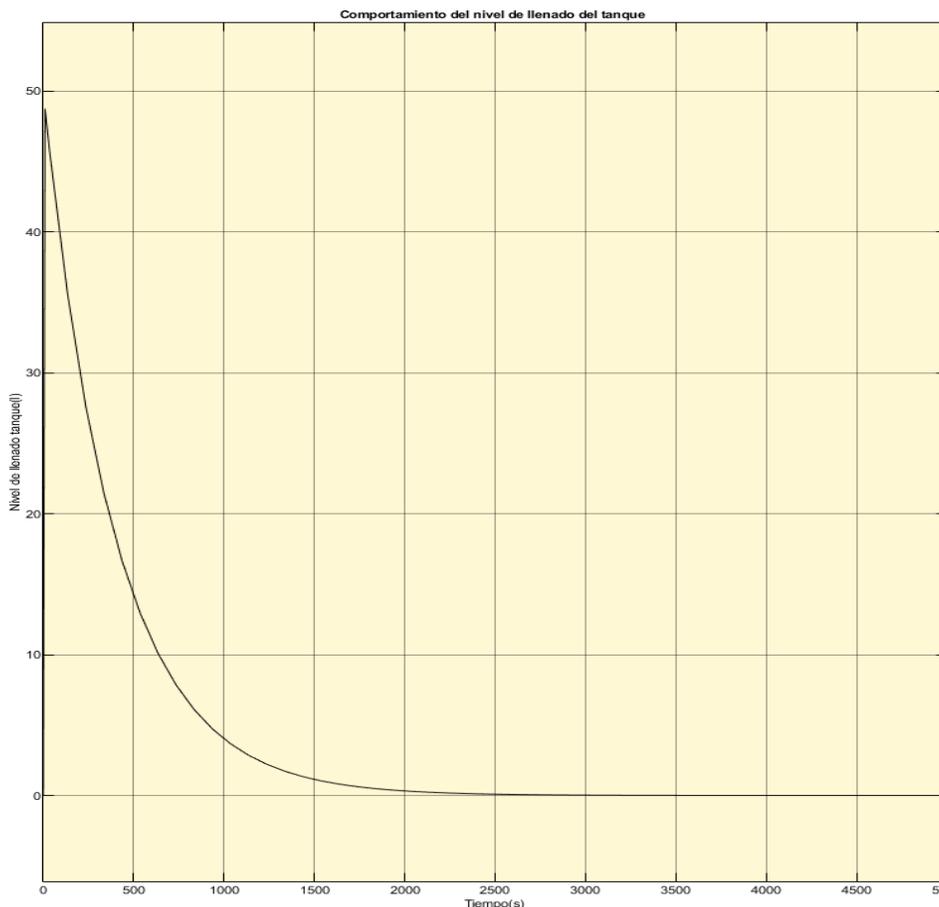
figura 4
 Modelado del comportamiento del subsistema hidráulico u
 tilizando la herramienta Simulink de Matlab 2019^a



Elaboración propia

En la figura 5 se presenta la respuesta del llenado del tanque para el subsistema hidráulico, según la entrada pulso. Se observa que el nivel de llenado del tanque disminuye a medida que pasa el tiempo, estabilizándose en 0.7894 litros, en un tiempo cercano a 2500 segundos.

figura 5
 Respuesta del comportamiento del nivel de llenado del tanque respecto al tiempo



Elaboración propia

3.2. Ensamblaje y prueba del prototipo

A partir, del diseño y el comportamiento de los subsistemas, se determinaron los componentes que conformaron el prototipo, cabe resaltar que la estructura del mismo propendió a estar formada por materiales reutilizados, entre los cuales se encontraron trozos de madera utilizados para las columnas y el techo, una pecera de vidrio como soporte y base del prototipo, y una botella de plástico para el tanque de agua correspondiente al subsistema de riego.

Para los subsistemas, con relación a la disponibilidad y el precio, se seleccionaron los siguientes componentes para la elaboración del prototipo:

- **Microcontrolador:** se utilizó el Arduino Mega, basado en el microcontrolador ATmega2560 que cumple con las características de comunicación. A diferencia de otros microcontroladores se distingue por la cantidad de puertos que posee y por su facilidad de uso y programación.

- Módulo de temperatura ambiente: se seleccionó el sensor DHT22, compatible con el microcontrolador que permite medir datos de temperatura para los valores entre -40 a $80\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$., incluyendo en su rango de medición el requerido por los cultivos, además registra los valores de humedad relativa del ambiente.
- Ventilador: dado que el invernadero tiene una superficie de $1,225\text{m}^2$, se usa un ventilador que opera a 110V y tiene un diámetro de 15 cm .
- Resistencia eléctrica: se usan resistencias elaboradas en cuarzo que operan a 110V , que facilitan incrementar en tiempos cortos el nivel de temperatura.
- Sensor de humedad de suelo: el sensor de humedad de suelo HL69, mide la humedad en el suelo de manera sencilla y rápida, mediante el análisis de la existencia o no de puentes que generan conductividad entre sus dos extremos.
- Electroválvula: se usa una electroválvula de $2,54\text{ cm}$ de diámetro, la cual permite el flujo de líquidos únicamente cuando existe una carga de 110V que se convierte en energía mecánica mediante el principio de magnetismo.
- Sistema de riego: debido a que los cultivos de prueba son de irrigación por goteo, se usó un sistema de riego que funciona a través de una manguera de plástico con diámetro de 1cm , instalado en la base del invernadero, que fue diseñado de manera artesanal inspirado en Gutiérrez, Villa-Medina, Nieto-Garibay y Porta-Gándara (2014). La manguera está conectada a la electroválvula y debido a la diferencia de presiones, se generan los flujos requeridos para humedecer el suelo.
- Monitoreo y ajuste de variables: una pantalla TFT *Touch Screen* con capacidad de color, permite presentar y recibir información en tiempo real de las variables y una comunicación directa con el microcontrolador para la administración.

Posteriormente, se ensamblaron los subsistemas de control de temperatura, conformado por la resistencia de cuarzo y el ventilador, y de control de humedad en el suelo, conformado por la fuente de agua y el medio de irrigación, como se evidencia en la figura 6.

Para probar el funcionamiento del prototipo se verificó el comportamiento y la interacción de cada uno de los componentes de los subsistemas. Primero, el sensor de temperatura envió datos al microcontrolador conforme fueron registrados; esto permitió regular la temperatura del ambiente mediante un ventilador y una resistencia de calor, los cuales fueron activados o desactivados mediante dos relés accionados por señales análogas desde el microcontrolador, con el propósito de mantener los valores de temperatura especificados.

figura 6
Prototipo ensamblado



Elaboración propia

Por su parte, el sensor de humedad de suelo envió datos recolectados al microcontrolador, el cual activó un relé que permitió el accionamiento o no de una electroválvula que dio vía libre al flujo de agua en el sistema de riego cuando fue necesario. Los datos registrados por el sensor se muestran en la Tabla 1, donde se relaciona la condición de humedad del suelo definida de manera subjetiva, asociándole un rango de valores obtenidos a partir del sensor y un rango equivalente en porcentaje de humedad, según la capacidad de área cultivada.

Tabla 1
Equivalencias Sensor HL69. Elaboración propia

Condición del suelo	Valores del Sensor HL69	Porcentaje de humedad según capacidad del área cultivada
Húmedo	0-399	100-66
Normal	400-600	65-60
Seco	601-1023	59-0

La interfaz de usuario permitió cambiar los parámetros iniciales de rango mínimo y máximo tanto de temperatura como de humedad y, por otro lado, visualizar los datos registrados por todos los sensores.

3.3. Comportamiento de los cultivos

3.3.1. Rábano

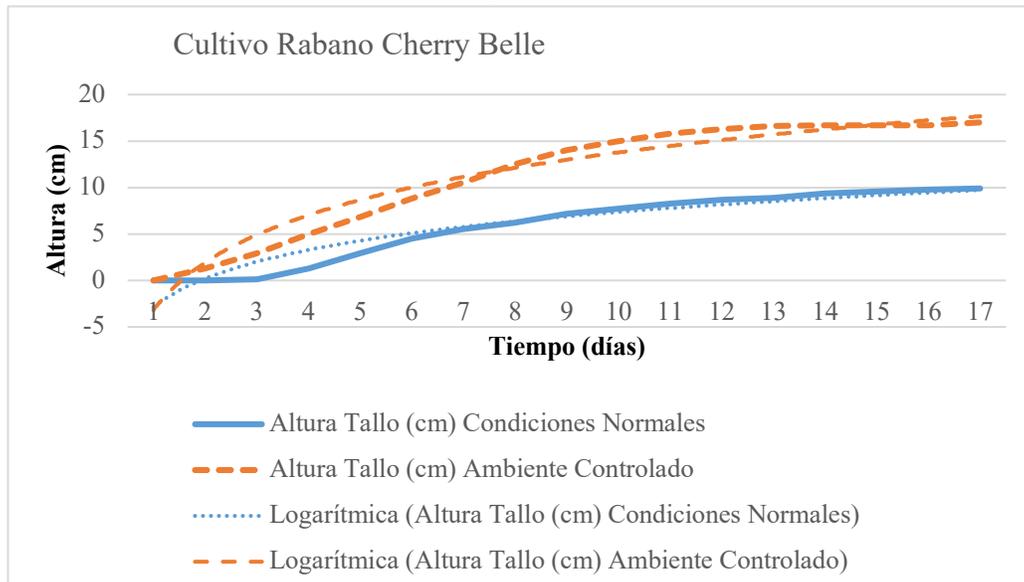
El crecimiento diario del tallo del cultivo mediante cuidados convencionales y en el ambiente controlado (prototipo) se relaciona dando como resultado los datos de la Tabla 2. La tabla se compone de el día de la medición, de la longitud del tallo de la planta del cultivo para el caso de estudio con condiciones normales y para el desarrollado en el ambiente controlado. Se observa que la longitud lograda por las plantas en la forma convencional fue de 9.9 cm, mientras que en el prototipo implementado fue de 17.0 cm lo cual representa un incremento del 58.24%.

Tabla 2
Crecimiento por día de los tallos para los cultivos de rábano mediante cuidados convencionales y en el ambiente controlado

Día	Longitud del tallo (cm) en condiciones ambientales normales	Longitud del tallo (cm) en ambiente controlado
1	0	0,0
2	0	1,3
3	0,1	2,9
4	1,3	5,0
5	2,9	6,8
6	4,5	8,8
7	5,5	10,5
8	6,2	12,5
9	7,2	14,0
10	7,7	15,0
11	8,3	15,8
12	8,7	16,3
13	8,9	16,6
14	9,4	16,7
15	9,6	16,7
16	9,8	16,7
17	9,9	17,0

Posteriormente, los datos de la Tabla 2 se graficaron, para evidenciar visualmente los resultados obtenidos por el cultivo en condiciones normales y en el ambiente controlado. En la figura 7 se observa que el crecimiento del cultivo en el prototipo propuesto es notablemente mayor en comparación con el cultivo desarrollado en condiciones normales, representando la obtención del producto esperado en un menor tiempo.

Figura 7
 Altura del tallo vs tiempo, de los cultivos de rábano



Elaboración propia

De las curvas obtenidas se establecieron dos aproximaciones logarítmicas:

$$f(x) = 7,36 \ln(x) - 3,18 \tag{1}$$

$$g(x) = 4,45 \ln(x) - 2,89 \tag{2}$$

Mediante el $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$ y $\lim_{x \rightarrow \infty} g(x)$ se evidencia que la función $f(x)$, donde se representa el crecimiento del tallo en el ambiente controlado, crece más rápidamente que la función $g(x)$, la cual representa el crecimiento en condiciones ambientales normales.

Cantidad de agua utilizada para el riego

El proceso de riego para el rábano se realizó para dos cultivos en ambientes independientes, uno en una maceta mediante riego convencional y el segundo en el ambiente controlado (prototipo) mediante el tanque de agua. En la Tabla 3, se muestra el registro en ml del agua destinada para el proceso de riego para una semana, el cual fue el mismo para todas las semanas de análisis, se relaciona de manera diaria el agua utilizada para el riego del cultivo en condiciones normales y en el ambiente controlado, y finalmente se totaliza el agua utilizada para riego en la semana.

Para obtener una relación del consumo de agua diario en ambos ambientes, se hace un promedio diario del consumo tanto en condiciones ambientales normales, como en el ambiente controlado, obteniendo

respectivamente 500 y 400 ml. Se encontró una reducción diaria en el consumo de 100 mililitros, es decir el 20%, ocasionado por el exceso de agua cuando se realiza de manera convencional.

Tabla 3

Registro agua utilizada para riego para los cultivos de rábano en ambientes mediante cuidados convencionales y controlado

Día	Agua de riego (ml) en condiciones ambientales normales	Agua de riego (ml) en ambiente controlado
1	500	2800
2	500	0
3	500	0
4	500	0
5	500	0
6	500	0
7	500	0
Total	3500	2800

Elaboración propia

3.3.2. Habichuela

Se obtuvo la germinación de 2 cultivos de habichuela mediante cuidados convencionales, de los cuales se midió el crecimiento diario del tallo para cada uno de ellos, a la par con el cultivo en el ambiente controlado (prototipo). En la Tabla 4 se pueden observar los datos obtenidos de la longitud de tallo de los diferentes cultivos. La tabla se compone de el día de la medición, de la longitud del tallo de la planta del cultivo para los casos de estudio con condiciones normales y para el desarrollado en el ambiente controlado. Se observa que la longitud lograda por las plantas en la forma convencional en el mejor caso fue de 78.0 cm, mientras que en el prototipo implementado fue de 109.0 cm para la habichuela lo cual representa un incremento del 39.74%.

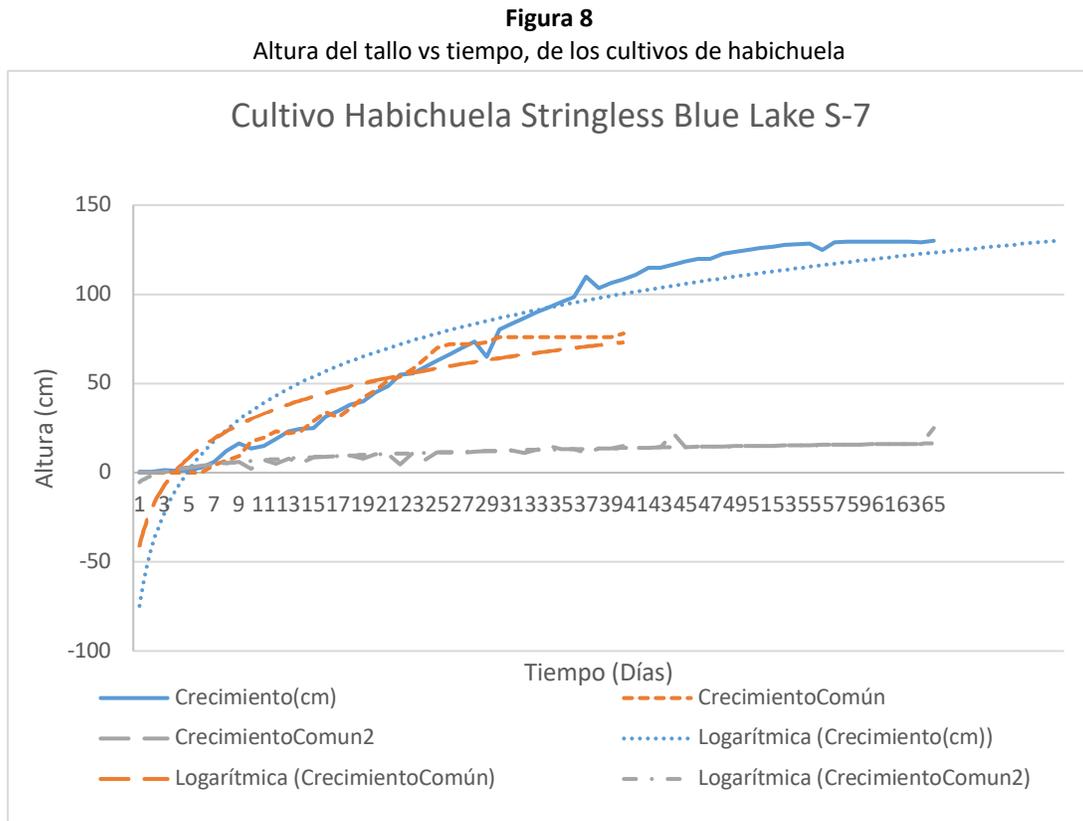
Tabla 4

Crecimiento por día de los tallos para los tres cultivos de habichuela en condiciones ambientales convencionales y en el ambiente controlado

Día	Longitud del tallo (cm) en condiciones ambientales convencionales (cultivo A)	Longitud del tallo (cm) en condiciones ambientales convencionales (cultivo B)	Longitud del tallo (cm) en ambiente controlado
1	0	0,0	0,5
2	0	0,0	0,5
3	0	0,3	1
4	0	1,8	1
5	0	3,0	1,3
6	0	3,9	3
7	4,3	4,7	6
8	6,6	5,4	12
9	9,3	6,0	16,5

Día	Longitud del tallo (cm) en condiciones ambientales convencionales (cultivo A)	Longitud del tallo (cm) en condiciones ambientales convencionales (cultivo B)	Longitud del tallo (cm) en ambiente controlado
10	17,5	2,0	13
11	19,6	7,1	15
12	23	5,0	19
13	22	7,9	23
14	23	5,5	25
15	29	8,7	25
16	34	9,0	31
17	31	9,3	35
18	36	9,6	38
19	42	8,0	40
20	46	10,2	45
21	52	10,4	49
22	54	4,5	55
23	58	10,9	56
24	64	7,0	59
25	70	11,3	63
26	72	11,5	66
27	72	11,0	70
28	72	11,9	73
29	73	12,1	65
30	76	12,3	80
31	76	12,5	83
32	76	11,0	87
33	76	12,8	90
34	76	15,0	93
35	76	13,1	96
36	76	13,2	98
37	76	11,0	110
38	76	13,5	104
39	76	13,6	106
40	78	15,0	109

Los datos de la Tabla 4 se grafican como se evidencia en la figura 8 y se establecen sus respectivas aproximaciones logarítmicas, obteniendo que la que presenta mejor desempeño es la referente al ambiente controlado (prototipo).



De las curvas obtenidas en la anterior figura, se establecieron tres aproximaciones logarítmicas:

$$f(x) = 47,432\ln(x) - 74,667 \quad (3)$$

$$g(x) = 31,021\ln(x) - 41,351 \quad (4)$$

$$h(x) = 5,186\ln(x) - 5,3581 \quad (5)$$

Mediante el $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$, $\lim_{x \rightarrow \infty} g(x)$ y $\lim_{x \rightarrow \infty} h(x)$ se evidencia que la función $f(x)$, donde se representa el crecimiento del tallo en el ambiente controlado, crece más rápidamente que la función $g(x)$ y $h(x)$, las cuales representan el crecimiento en condiciones ambientales convencionales.

Cantidad de agua utilizada para el riego

El proceso de riego para la habichuela se realizó para tres cultivos en ambientes independientes, dos mediante cuidados convencionales, los cuales fueron los que germinaron, encargados a miembros de la comunidad, y el ultimo en el ambiente controlado (prototipo). En la Tabla 5, se muestra el registro en ml del agua destinada para el proceso de riego para una semana, el cual fue el mismo para todas las semanas de análisis, se relaciona de

manera diaria el agua utilizada para el riego de los cultivos en condiciones normales y en el ambiente controlado, y finalmente se totaliza el agua utilizada para riego en una semana.

Tabla 5
Registro agua utilizada para riego para los cultivos de habichuela en ambientes mediante cuidados convencionales y controlado

Día	Agua de riego (ml) en condiciones convencionales (cultivo A)	Agua de riego (ml) en condiciones ambientales convencionales (cultivo B)	Agua de riego (ml) en ambiente controlado
1	200	150	49
2	40	70	0
3	35	75	0
4	25	75	0
5	40	75	0
6	35	75	0
7	40	75	0
Total	415	595	49

Elaboración propia

Para obtener una relación del consumo de agua diario en los tres ambientes, se hace un promedio diario del consumo tanto en condiciones ambientales normales, como en el ambiente controlado, obteniendo respectivamente 59, 85 y 7 ml. El consumo de agua de la habichuela disminuyó en un valor entre 52 y 78 mililitros por día, obteniendo un 88% y 91% de disminución del suministro de agua respectivamente, ocasionados por el exceso de agua cuando se realiza de manera convencional.

3.4. Tiempo de dedicación para los cultivos

El monitoreo y control de los cultivos de rábano y habichuela, en ambientes mediante cuidados convencionales y controlado (prototipo), requirió un tiempo de dedicación semanal para cada uno de los entornos, en los ambientes mediante cuidados convencionales este tiempo incluía las actividades de riego, posicionamiento del cultivo en lugares de sombra o sol, y medición de la longitud del tallo, por otra parte, en el ambiente controlado, requirió el tiempo de llenado del tanque de agua semanalmente y la medición de la longitud del tallo. El tiempo dedicado semanalmente para ambos ambientes, con cuidados convencionales y controlado (prototipo), se muestra en la Tabla 6, donde se relaciona el número de semanas, junto con el tiempo invertido durante esta en los ambientes mediante cuidados convencionales y el ambiente controlado, y finalmente se realiza un promedio del tiempo de dedicación en ambos entornos.

La forma convencional de cultivo exige una dedicación semanal promedio de 80 minutos, mientras que aplicando el prototipo implementado se requieren únicamente en promedio 8 minutos semanales, empleados en la recarga del depósito de agua y la medición de la longitud del tallo, lo cual representa una reducción de tiempo del 90%.

Tabla 6

Registro tiempo de dedicación para los cultivos de rábano y habichuela en ambientes mediante cuidados convencionales y controlado.

Semana	Ambientes cuidados convencionales (minutos)	Ambiente controlado (minutos)
Semana 1	100	11
Semana 2	96	9
Semana 3	90	8
Semana 4	70	8
Semana 5	64	7
Semana 6	60	5
Promedio	80	8

Elaboración propia

4. Discusión

A partir, de los resultados obtenidos que denotaron el ahorro de agua al realizar el proceso de cultivo en el prototipo propuesto, se infiere que este colabora con el cuidado de las fuentes hídricas, que en cultivos llevados a cabo de manera tradicional llegan a ser contaminadas y usadas excesivamente.

Por otra parte, el prototipo al ser un artefacto portable puede ser utilizado por cualquier tipo de usuario, aportando a los procesos de agricultura urbana actuales, e influyendo parcialmente en la reducción de costos de compra de víveres y alimentos, que, al ser producidos en la misma propiedad de residencia del consumidor, le representa un ahorro de costes de transporte.

La reutilización de materiales reciclados en la elaboración del prototipo influye en la reducción de costos de construcción, brindando la posibilidad de ser adquirido por un mayor número de personas interesadas en la agricultura urbana.

5. Conclusiones

El sistema de riego del ambiente controlado, accionado mediante el uso de sensores que detectan cambios en la humedad del suelo, proporcionó con mayor precisión la cantidad de agua requerida por cada cultivo, reduciendo en gran medida el uso del agua en un 20% para el rábano y 91% para la habichuela respecto a los cultivos desarrollados en los ambientes convencionales.

El uso del prototipo realizado, a partir de un sistema de sensores y actuadores que mantienen los valores de temperatura ambiente y humedad del suelo en los parámetros requeridos por cada cultivo, permitió un aumento en el crecimiento del tallo del cultivo de rábano en un 58.24% y de la habichuela en un 39.74%.

La gestión del ambiente del invernadero mediante un microcontrolador electrónico para el cultivo de vegetales presentó una disminución del tiempo de dedicación para los cultivos estudiados en un 90%, lo que implica que esta solución favorece el monitoreo del cultivo con menos tiempo de dedicación.

En la construcción del prototipo se utilizó madera y vidrio para la estructura, así como botellas plásticas para el depósito de agua. Con la recuperación de estos materiales se reduce la cantidad de desechos arrojados a las calles o depositados en los rellenos sanitarios, ampliando su vida útil.

Referencias bibliográficas

- Aju, G. N., Akhil, C., Ganga, M., & Tony, K. F. (2014). Smart Vertical Farming Using Hydroponics. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 1, 14-17.
- Dan, L., Jianmei, S., Yang, Y., & Jianqiu, X. (2016). Precise Agricultural Greenhouses Based on the IoT and Fuzzy Control. *2016 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*, (pp. 580-583). Changsha. doi:10.1109/ICITBS.2016.19
- FAO Dirección de Producción y Protección Vegetal (2002). *El Cultivo Protegido en Clima Mediterráneo*. Roma: FAO.
- Gondchawar, N., & Kawitkar, R. (2016). IoT Based Smart Agriculture. *IJARCCCE*, 5(6), 838-842. doi:10.17148/IJARCCCE.2016.56188
- Gutiérrez, J., Villa-Medina, J. F., Nieto-Garibay, A., & Porta-Gándara, M. Á. (2014). Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(1), 166-176.
- Kang, M., Fan, X., Hua, J., Wang, H., Wang, X., & Wang, F. (2018). Managing Traditional Solar Greenhouse With CPSS: A Just-for-Fit Philosophy. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 48(12), 3371-3380. doi:10.1109/TCYB.2018.2858264
- Larson, R., Hostetler, R., & Edwards, B. (2006). *Cálculo*. Madrid: McGraw-Hill.
- Parkhomenko, A., Gladkova, O., Ivanov, E., Sokolyanskii, A., & Kurson, S. (2015). Development and Application of Remote Laboratory for Embedded Systems Design. *International Journal of Online Engineering*, 11(3), 27-31.
- Santos, M. (2013). Control Theory (Cybernetics). En *Encyclopedia of Sciences and Religions*. (pp. 496). Dordrecht: Springer.
- Siddiqui, M. F., Khan, A. U., Kanwal, N., Mehdi, H., Noor, A., & Khan, M. A. (2017). Automation and monitoring of greenhouse. *2017 International Conference on Information and Communication Technologies (ICICT)*, (pp. 197-201). Karachi. doi:10.1109/ICICT.
- Sommerville, I., Campos, O. V., & Fuenlabrada, V. S. (2011). *Ingeniería de software*. Madrid: Pearson.
- Somov, A., Shadrin, D., Fastovets, I., Nikitin, A., Matveev, S., Seledets, I., & Oleksii, H. (2018). Pervasive Agriculture: IoT-Enabled Greenhouse for Plant Growth Control. *IEEE Pervasive Computing*, 17(4), 65-75. doi:10.1109/MPRV.2018.2873849
- Teslyuk, T., Denysyuk, P., Kernytskyy, A., & Teslyuk, V. (2015). Automated control system for arduino and android based intelligent greenhouse. *2015 XI International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, (pp. 7-10). Lviv.

- Trejo-Perea, M., Herrera-Ruiz, G., Rios-Moreno, J., Castañeda Miranda, R., & Rivasaraiza, E. (2009). Greenhouse Energy Consumption Prediction using Neural Networks Models. *International Journal Of Agriculture & Biology*, 11(1), 1-6.
- Ullas, S. P., Saiprasad, Shrivankumar, & Veerabhadra, K. J. (2016). Green House Monitoring and Controlling Using Android Mobile App. *International Journal of Combined Research & Development (IJCRD)*, 5(5), 710-714.

