



e-ISSN 2588-0721
DOI: [10.33936/riemat.v11i2.8336](https://doi.org/10.33936/riemat.v11i2.8336)

RIEMAT

Página web de la revista: <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Riemat>



Artículo Original

Controlador lógico (On-Off/Difuso) de bajo costo para Control climático automatizado en invernaderos.

Low-cost logic controller (On-Off/Fuzzy) for automated climate control in greenhouses.

Raudel Flores-Moreno ^a, Edurnet Jhaquelin Luna-Becerril ^b, Ernest Yasser Núñez-Betancourt ^{c*}, Omar Peña-Sosa ^d

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Politécnica de Texcoco, Texcoco, México.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3917-1355>

^b Ingeniería en Sistemas Computacional, Facultad de Ingeniería, Universidad Politécnica de Texcoco, Texcoco, México.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3435-263X>

^c Administración y Comercio, Comercio Internacional y Aduanas, Universidad Politécnica de Texcoco, Texcoco, México.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5706-1854>, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9100-0373>

* Autor para correspondencia.

ernest.nunezbe@uptex.edu.mx

Recibido: 30/03/2026
Aceptado: 06/06/2026
Publicado: 20/08/2026

Citacion sugerida: Flores-Moreno, R., Luna-Becerril, E., Núñez-Betancourt, E. & Peña-Sosa, O. (2026). Controlador lógico (On-Off/Difuso) de bajo costo para Control climático automatizado en invernaderos. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología. RIEMAT*, 11(2), 46-59. <https://doi.org/10.33936/riemat.v11i2.8336>

Resumen

En México, la adopción de sistemas de invernadero inteligente sigue limitada por el costo de las soluciones comerciales y por restricciones de infraestructura digital en zonas rurales. El objetivo de este trabajo fue presentar el diseño e implementación de un prototipo a escala para monitoreo climático automatizado en invernaderos, orientado a cultivos de porte bajo. El sistema integra sensores DHT22, FC-28 y MQ-7, una placa Arduino Uno, una Raspberry Pi 3B como servidor local, y una interfaz web desarrollada con Node.js, HTML, CSS y JavaScript, con almacenamiento en MySQL. La evaluación realizada fue de carácter cualitativo y se centró en verificar la lectura de sensores, la transmisión de datos, el registro en base de datos y la visualización en tiempo real mediante un dashboard web. Los resultados muestran viabilidad funcional del prototipo en condiciones de laboratorio; sin embargo, se requieren pruebas cuantitativas, evaluación comparativa del control y análisis económico para validar su desempeño en condiciones reales de operación.

Palabras clave: agricultura protegida, invernaderos inteligentes, control climático automatizado, microcontrolador

Abstract

Smart greenhouse adoption in Mexico is constrained by the cost of commercial solutions and by limited digital infrastructure in rural areas. This study presents the design and implementation of a low-cost scale prototype for automated greenhouse climate monitoring intended for low-growing crops. The system integrates DHT22, FC-28, and MQ-7 sensors, an Arduino Uno board, a Raspberry Pi 3B as a local server, and a web interface developed with Node.js, HTML, CSS, and JavaScript, with data storage in MySQL. The evaluation was qualitative and focused on verifying sensor readings, data transmission, database logging, and real-time visualization through a web dashboard. The results indicate functional feasibility under laboratory conditions; however, quantitative tests, comparative controller evaluation, and an economic analysis are still required to validate performance under real operating conditions.

Keywords: protected agriculture, smart greenhouses, automated climate control, microcontroller

1. Introducción

Muchos países, como México, buscan aumentar las exportaciones de productos agrícolas y disminuir importaciones, como estrategia de soberanía alimentaria. Por lo que el país está en proceso de expansión agrícola y busca mejorar la tecnología de producción (Tilman et al., 2011).

Los invernaderos con cubierta de plástico en la década de 1970 ocupaban 2,8 millones de ha a nivel mundial, en el año 1997 la superficie había crecido a 38 millones de ha y continúa aumentando a un ritmo acelerado, en Asia y África, el uso de invernaderos de plástico crece entre un 15 % y un 30 % al año actualmente (Perilla & Mas, 2019).

La agricultura protegida en México enfrenta un paradigma crítico, mientras el 65 % de las 25,814 unidades de producción emplean invernaderos (SIAP, 2023), solo el 12 % incorpora tecnologías de automatización (FAO, 2022). Los invernaderos inteligentes, impulsados por el Internet de las Cosas (IoT) y la agricultura de precisión, han demostrado aumentar la productividad hasta en un 40 % y reducir el consumo de agua en un 35 % mediante el control automatizado de variables ambientales (Marín-García, et al., 2023). Sin embargo, en países como México, su adopción masiva se ve limitada por barreras económicas, técnicas y culturales (Boonyopakorn, & Thongna, 2020).

A nivel internacional, los invernaderos de alta tecnología han evolucionado hacia sistemas autónomos basados en Redes de sensores inalámbricos (LoRaWAN, ZigBee) para monitoreo en tiempo real (Li, Wang, Liu, Wang & Luo, 2023). También la aplicación de Inteligencia Artificial (IA) para predicción de cosechas y detección temprana de plagas y en materia de robótica agrícola en países como Países Bajos, el 90 % de los invernaderos usan brazos mecánicos para la cosecha (Van Henten, et al., 2002). En contraste, México aún depende de invernaderos convencionales, donde el 78 % de las pérdidas agrícolas se deben a fluctuaciones climáticas no controladas.

La transición hacia invernaderos inteligentes enfrenta tres desafíos clave: costos de implementación, ya que las soluciones comerciales superan los \$50,000 MXN por hectárea; resistencia al cambio, puesto que el 62 % de los agricultores en pequeña escala desconocen las ventajas de los sistemas inteligentes; y una brecha tecnológica, porque solo el 34 % de las zonas rurales cuenta con conectividad para IoT (IFT, 2024). A pesar de ello, proyectos locales han mostrado que soluciones de bajo costo basadas en Arduino y Raspberry Pi pueden contribuir al monitoreo y control ambiental en contextos con recursos limitados.

La agricultura protegida surge como respuesta a los desafíos del cambio climático y la creciente demanda de alimentos. Los invernaderos permiten controlar variables ambientales, aumentando la productividad en un 300 % frente a cultivos a cielo abierto (FAO, 2023). Sin embargo, su eficiencia óptima solo se logra mediante sistemas automatizados para reducir el error humano y optimiza recursos (Marín-García, et al., 2023).

Los invernaderos no detienen su desarrollo y se aprecian las varias generaciones: 1ª Generación (Estructuras Pasivas): Dependen totalmente del clima local; 2ª Generación (Control Manual): Uso de ventilación y riego manual; 3ª Generación: Integran sensores y actuadores básicos y 4ª Generación (Inteligentes): IoT + IA para toma de decisiones autónomas.

Otros investigadores realizaron un invernadero de riego y temperatura controlado remotamente desde el web basado en tecnologías móviles (Barón & Pérez, 2016). Otro investigador, se encargó de desarrollar una aplicación móvil en la Universidad Politécnica de Madrid, que permitió el control y monitorización de un invernadero a través de una aplicación móvil, de las variables del sistema de forma rápida y eficiente (Barroso García, 2015). Mediante la implementación de EfficientNet-B4 optimizado con Ranger, se desarrolló un modelo de clasificación que aborda el complejo problema de la similitud entre el mildiu polvoso y el mildiu vellosa en hojas de pepino, incluso cuando coexisten en una misma hoja (Zhang, Yang & Li, 2020). El modelo logró una precisión del 96 %, demostrando alta eficacia en condiciones de invernadero reales con iluminación variable.

Europa y Asia adoptan Agricultura 4.0 con sistemas SCADA para supervisión centralizada y sensores hiperspectrales para estrés hídrico. El concepto de agricultura 4.0 ha emergido como una evolución de la agricultura de precisión (AP) a través de la difusión del Internet de las cosas (IoT), la analítica de datos y el machine learning, aplicados a la cadena de valor del sector agropecuario (Tovar-Quiroz, 2023). En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo presentar el diseño e implementación de un sistema

de control climático automatizado de bajo costo para un prototipo de invernadero, que integra sensores DHT22, FC-28 y MQ-7 para monitoreo ambiental y de seguridad, actuadores de ventilación y nebulización, y una interfaz web desarrollada con Node.js y MySQL para la visualización de datos.

2. Materiales y Métodos

El prototipo propuesto emplea tecnologías IoT de bajo costo para integrar sensores ambientales, un microcontrolador Arduino Uno y una Raspberry Pi 3B como servidor local. Se utilizaron los sensores DHT22 para temperatura y humedad relativa del aire, FC-28 para humedad del suelo y MQ-7 para detección de monóxido de carbono como variable de seguridad. La adquisición y transmisión de datos se realizó mediante comunicación serial USB/RS-232, mientras que el almacenamiento y la visualización se implementaron con Node.js y MySQL.

La investigación se desarrolló en condiciones de laboratorio, en un prototipo a escala montado en un entorno universitario controlado. La evaluación experimental fue de carácter cualitativo y se orientó a verificar: i) la lectura y transmisión de señales desde los sensores, ii) el registro de datos en la base MySQL, iii) la visualización en tiempo real en la interfaz web y iv) el accionamiento manual de ventiladores y nebulizadores. No se ejecutó una campaña de ensayos cuantitativos ni una comparación experimental con estrategias de control On-Off, PID o difusas.

Para el caso de visualización de datos se emplean plataformas como Node.js + MySQL que son una combinación óptima para dashboards en tiempo real. También se empleó Ubidots con plataforma Cloud para el caso particular de análisis históricos.

La lechuga es uno de los cultivos más comunes en sistemas de agricultura protegida debido a su ciclo corto, alta demanda y sensibilidad a condiciones ambientales extremas. Los cultivos de lechuga (*Lactuca sativa*) se benefician significativamente de los invernaderos y sistemas protegidos. En la Tabla 1 se resumen parámetros agronómicos de referencia para temperatura, humedad relativa del aire y humedad del suelo, variables directamente consideradas en el prototipo desarrollado.

Tabla 1.

Parámetros agronómicos críticos en invernaderos para el cultivo de lechuga.

Variable	Rango Óptimo (Lechuga)	Sensor Recomendado
Temperatura	15-22 °C	DHT22
Humedad del Aire	60-70 %	SHT31
Humedad del Suelo	20-30 %	FC-28

Nota: Lawrence & Ortega (2019). Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Agricultura protegida en México.

Dentro de las ventajas del cultivo en invernadero se tiene la reducción de ciclo: 45 días en invernadero vs. 70 días en campo (Resh, 2022); el ahorro de agua: 70 % menos que en suelo (Resh, 2022) y el control de calidad: Hojas más tiernas y libres de tierra (FAO, 2023).

En la Tabla 2 se aprecia Características generales del cultivo en invernaderos de lechuga, donde destaca que la planta requiere para su desarrollo óptimo una larga duración del día para el aprovechamiento de la luz solar, aunque puede sufrir estrés en caso de someterse a temperaturas elevadas por largos periodos continuos. Esta condición es crucial para entender las ventajas de un control de clima automatizado en el aumento de su productividad y calidad. También toma relevancia el nivel de humedad de suelo y su estricto control ya que este cultivo se desarrolla a poca profundidad entre 20–30 cm y requiere que el sustrato este bien drenados en condiciones óptimas de humedad.

Tabla 2.

Características generales del cultivo.

Parámetro	Descripción
Tipo de planta	Herbácea anual, ciclo rápido (45–60 días en hidroponía).
Variedades comunes	Romana, Iceberg, Butterhead, Hoja de roble (adaptables a invernadero).
Sistema radicular	Superficial (20–30 cm de profundidad), requiere sustratos bien drenados.
Fotoperiodo	Planta de día largo, pero sensible a floración prematura por estrés térmico.

Nota: Gunko et al., (2021).

La Tabla 3 resume rangos de referencia para temperatura, humedad relativa y luz (PPFD) en el cultivo de lechuga en invernadero. Estos valores se presentan como marco agronómico de consulta y no como variables validadas experimentalmente en el prototipo descrito en este trabajo.

Tabla 3.

Parámetros ambientales óptimos para la lechuga.

Variable	Rango Óptimo	Sensor Recomendado	Efectos por Desviación
Temperatura	18–22°C (día) / 12–15°C (noche)	DHT22 / DS18B20	>25°C: Amargor, floración prematura. <10°C: Crecimiento lento.
Humedad Relativa del aire	60–70%	SHT31	>80%: Promueve hongos (mildiu). <50%: Estrés hídrico.
Luz (PPFD)	200–400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (16 h luz)	Sensor PAR Apogee	<150 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$: alargamiento y etiolación.

Nota: elaboración propia a partir de Lawrence & Ortega (2019) y Resh (2022).

Existen una gran brecha tecnológica para los países en desarrollo, México enfrenta tres barreras clave, primero limitaciones de infraestructura, ya que solo el 34 % de las zonas agrícolas tiene conectividad 4G (IFT, 2024). Segundo altos costos porque las soluciones comerciales superan los \$100,000 MXN/hectárea (INIFAP, 2020). La adopción de tecnologías agrícolas de precisión en México se ve frenada por múltiples barreras. En primer lugar, existe una limitante de infraestructura digital, ya que solo el 56% de las unidades de producción en zonas agrícolas cuenta con cobertura de internet (21). En segundo término, los altos costos representan un obstáculo sustancial, pues las soluciones comerciales de agricultura de precisión pueden superar los 100,000 MXN por hectárea al año (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2021). Finalmente, la resistencia al cambio y la preferencia por métodos tradicionales entre una porción significativa de los agricultores consolidan la tercera barrera.

A nivel global, existen numerosas iniciativas que demuestran el potencial de la tecnología para revolucionar la agricultura. Un ejemplo destacado es el proyecto Internet of Food & Farm 2020 en la Unión Europea, el cual integró sensores IoT y análisis de datos para la agricultura de precisión en cultivos como viñedos y lechugas. Aunque el proyecto logró una reducción del 20-30% en el uso de agua y fertilizantes, su implementación requirió una inversión inicial y un conocimiento técnico que resultan prohibitivos para la mayoría de los pequeños y medianos agricultores (Verdouw, Wolfert & Goorman, 2021). Por otro lado, en Brasil, la Empresa Brasileña de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) desarrolló una estación meteorológica y de monitoreo de suelos de bajo costo, basada en plataformas abiertas como Arduino. Esta solución demostró ser efectiva para optimizar recursos hídricos en fincas familiares, pero su diseño específico y la dependencia de mantenimiento local han limitado su escalabilidad masiva a diferentes contextos agroecológicos (Embrapa

La base Teórica del Sistema Propuesto se fundamenta en Teoría de Control Óptimo (Kalman, 1960). para
ajustar actuadores en tiempo real. Modelo de Capas IoT (Júnior, de Almeida & da Silva, 2024). para:
Percepción: Sensores; Red: WiFi/LoRa; Procesamiento: Raspberry Pi; Aplicación: Dashboard Node.js.

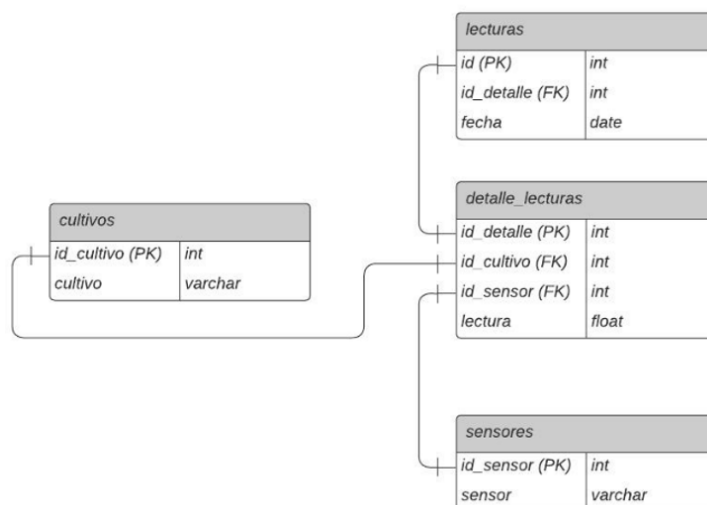
Diseño de diagrama de flujo: detalla el proceso de recolección y visualización de datos.

Implementación de circuito electrónico: integra sensores, Arduino y actuadores (ventiladores, nebulizadores).

Los requerimientos y requisitos funcionales son los siguientes: desarrollar y diseñar un sistema de información en entorno web empleando tecnologías como HTML, css y JavaScript; la interfaz deberá almacenar los datos de forma automática a través de un gestor de base de datos, como es el caso de MySQL; interfaz gráfica que permita al usuario realizar muestreo y visión de datos censados en tiempo real y de forma gráfica y control de actuadores del sistema; el sistema web deberá encontrarse intercomunicado con un sistema embebido como la placa de Arduino mediante la comunicación serial; aplicación desarrollada en Arduino IDE, la cual será la encargada de organizar el funcionamiento lógico.

En la Figura 1 se muestra el Diagrama Entidad-Relación de la base de datos relacionada por la llave primaria y llave foránea. Se aprecia también la relacionadas de las tablas (sensores, cultivos, lecturas y detalle lecturas).

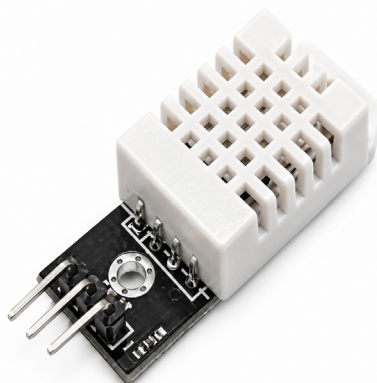
Diagrama Entidad-Relación.



El sensor de temperatura y Humedad DHT22 (Figura 2) es un sensor básico digital de medición de temperatura y humedad. Este sensor está basado en un termistor que sirve para medir el aire circundante (temperatura) e implementa un sensor interno capacitivo para la medición de humedad. El voltaje de alimentación debe estar entre 3.3V y 6V DC. Cada sensor de este modelo tiene compensación de temperatura y está calibrado en una cámara de calibración precisa. El DHT22 usa únicamente tres de los cuatro pines para funcionar, los cuales son VCC, SDA, NC y GND. Mide temperatura y humedad ambiental.

Figura 2.

Sensor de temperatura y Humedad DHT22.



Nota: HWLibre (s.f.).

Los sensores MQ-7 (Figura 3) se utilizan para detectar monóxido de carbono en dispositivos que tratan este gas en fábricas y hogares tienen estable y larga vida, son muy sensibles al monóxido de carbono.

Figura 3.

Sensor de monóxido de carbono MQ-7.

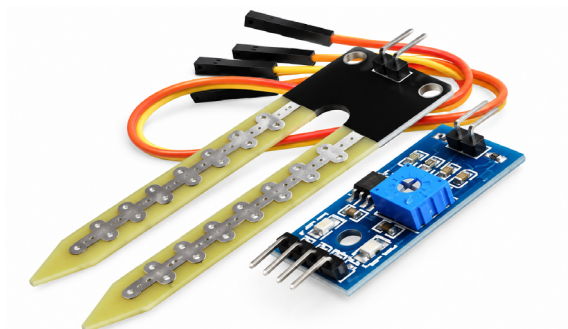


Nota: Sando Robotics (s.f.).

Un higrómetro de suelo FC-28 (Figura 4) es un sensor que mide la humedad del suelo. Son ampliamente empleados en sistemas automáticos de riego para detectar cuando es necesario activar el sistema de bombeo. El FC-28 es un sensor sencillo que mide la humedad del suelo por la variación de su conductividad. El sensor FC-28 cuenta con una pequeña placa que nos resuelve en gran parte las cosas, porque nos entrega directamente el valor analógico de la conductividad o también el valor digital si se supera un umbral determinado de humedad. El valor o umbral lo medimos mediante un potenciómetro, es un trabajo manual, entregara un uno cuando se consiga superar o igualar el nivel de humedad medido y entregara un cero cuando la humedad del suelo este por debajo de ese umbral.

Figura 4.

Sensor de Humedad de suelo FC-28.

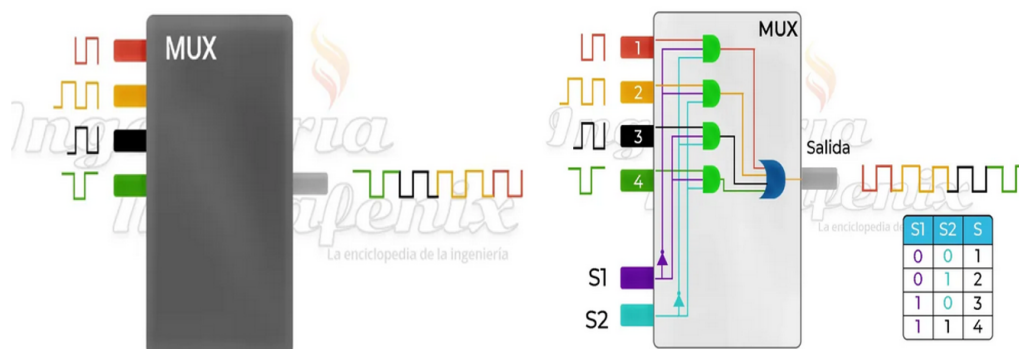


Nota: Amazon México (s.f.).

En la Figura 5 se muestra un Multiplexor el cual es un dispositivo electrónico de circuito combinacional que dispone “n” entradas de datos, una sola salida de datos y cuenta con “n” líneas de selección. Las entradas y las salidas pueden ser análogas o digitales.

Figura 5.

Multiplexor.



Nota: Ingmecafenix (s.f.).

Para la modelación del sistema y determinar la posición correcta de los elementos se empleó SolidWorks para el procedimiento de diseño en 3D. A partir de este modelo, puede crear dibujos en dos dimensiones o componentes de relaciones de posición que consten de piezas o sub-ensamblajes para crear ensamblajes.

El lenguaje usado es sobre la base de la plataforma Arduino propio que está basado en C/C++. Una vez dicho esto manda las instrucciones a la placa Arduino la cual se encarga de realizar las instrucciones escritas en la plataforma.

Tecnologías de Software y Comunicación Serial: Node.js: Para el servidor web y comunicación en tiempo real; MySQL: Almacenamiento estructurado de datos; Arduino IDE: Programación del microcontrolador.

El sistema utiliza protocolos RS-232 y USB para la transmisión de datos entre Arduino y la Raspberry Pi, en la Tabla 4 se muestra a detalle las características técnicas de la Raspberry utilizada. Es importante señalar que la placa Raspberry utilizada cuenta con el sistema operativo Raspberry Pi OS, el cual es una distribución de Debian y fue instalado mediante la herramienta Raspberry Pi Manager v 1.7.4.

Tabla 4.

Características de Raspberry Pi 3B.

Chipset Broadcom BCM2837	1.2 GHz
ARM Cortex-A53	64 bits y cuatro núcleos
LAN inalámbrica	802.11 b/g/n
Memoria LPDDR2	1 GB
Puerto Ethernet	1 puerto 10/100
Conector de video	HDMI
Puertos USB 2.0	4 puertos
Pines GPIO	40 pines
Ranura de tarjeta	MicroSD

Es importante mencionar que el sistema web fue diseñado en HTML, CSS y JavaScript bajo el concepto cliente-servidor. Por esta razón, se optó por crear un servidor web en el entorno de Node.js, que permitió implementar librerías como serialport, socket.io y express para la recepción de datos en serie y en tiempo real mediante sockets.

3. Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos corresponden a una verificación funcional cualitativa del prototipo a escala. Se comprobó la integración entre el circuito electrónico, la base de datos y la interfaz web, así como la recepción de lecturas ambientales y su almacenamiento en MySQL. En esta etapa no se estimaron métricas de error, estabilidad o tiempo de respuesta; por tanto, el desempeño del sistema no debe interpretarse como una validación cuantitativa.

La Raspberry Pi modelo 3B, fue destinada a funcionar como un servidor local, que almacena el sistema web desarrollado e interconecta a la placa de desarrollo de Arduino mediante una conexión USB, esta a su vez al circuito combinacional. En la Figura 6, se muestran las placas interconectadas.

Figura 6.

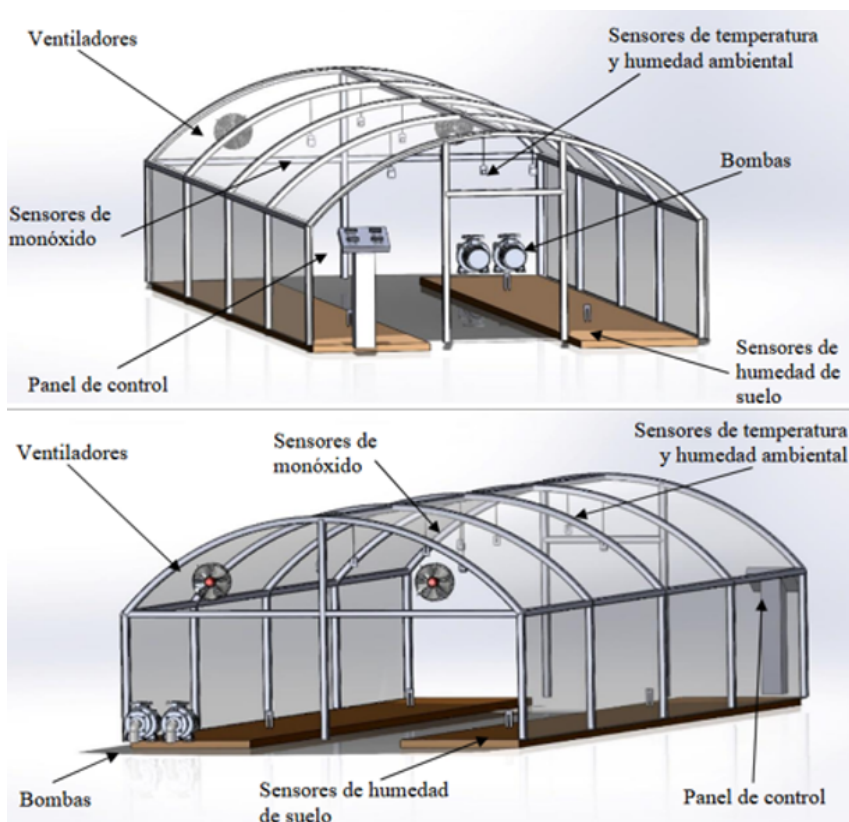
Interconexión de componentes.



En la Figura 7 se muestra el resultado del modelo estructural en 3D del invernadero prototipado a escala mediante el programa SolidWorks, para la simulación del posicionamiento de los componentes electrónicos a utilizar.

Figura 7.

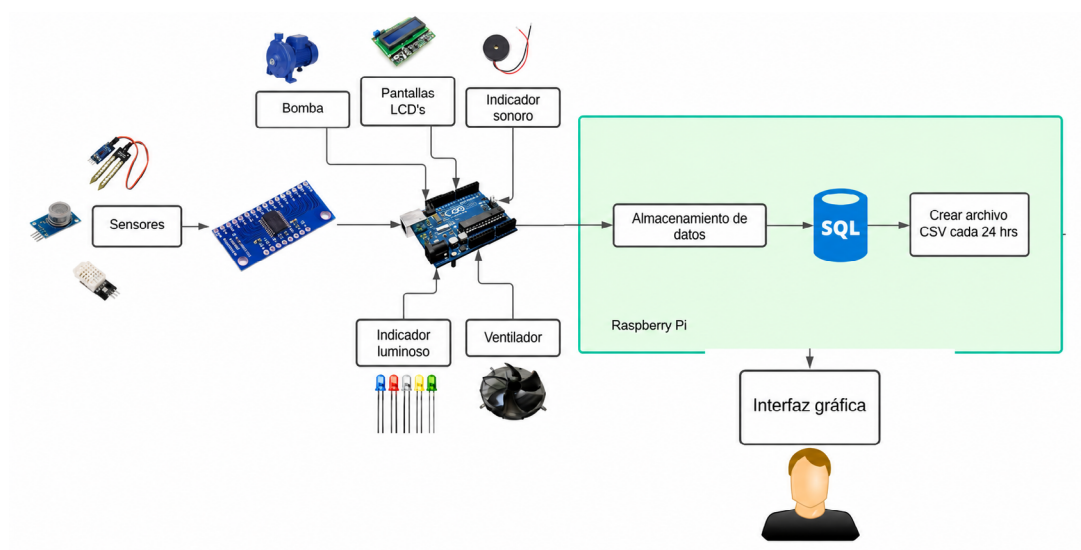
Modelo Estructural en 3D del prototipo de Invernadero.



En la Figura 8 se muestra el Diagrama Funcional, con los elementos fundamentales (usuario, hardware y software), donde se aprecia el comportamiento lógico del sistema con el usuario, la interconexión entre el circuito combinacional, el microprocesador y el microcontrolador junto con los componentes electrónicos utilizados, además de representar el comportamiento de la aplicación con la base de datos en el servidor.

Figura 8.

Diagrama funcional.



Para empezar a utilizar el sistema se debe acceder al servidor local que está alojado en la Raspberry, escribiendo en nuestro navegador “Localhost:4000”.

MySQL - PhpMyAdmin

Para realizar la tarea de muestreo de datos, se implementó una base de datos relacional en MySQL, apoyada por phpMyAdmin para la inspección de las tablas y la consulta de registros históricos.

Interfaz gráfica del sistema

Posteriormente al diseño de la base de datos y a la configuración de la Raspberry como servidor local, se desarrolló la interfaz gráfica del sistema en lenguaje JavaScript y HTML.

La Figura 9 muestra la pantalla de bienvenida al sistema donde se aprecia el menú en la parte superior derecha (1), este menú es de manera informativa y totalmente visual, al presionar el botón (2) de “conócenos” nos mandara al apartado “soluciones”, a continuación, se muestra en la siguiente figura.

Figura 9.

Pantalla de bienvenida.



En la Figura 10, se muestra la pestaña “SISTEMAS”, el cual permite ajustar los parámetros al tipo de cultivo seleccionado. Cada icono de cultivo carga la información de control necesaria para que el sistema de control de clima opere con eficiencia.

Figura 10.

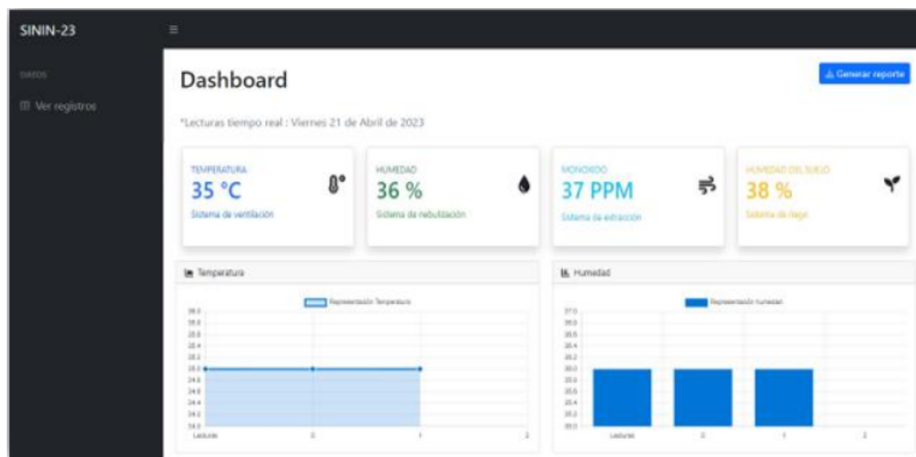
Selección de cultivos, en la página de bienvenida.



La interfaz del sistema también permite mostrar las lecturas del servidor en tiempo real (Figura 11), y de manera gráfica, el usuario puede mediante esta plataforma controlar los actuadores manualmente.

Figura 11.

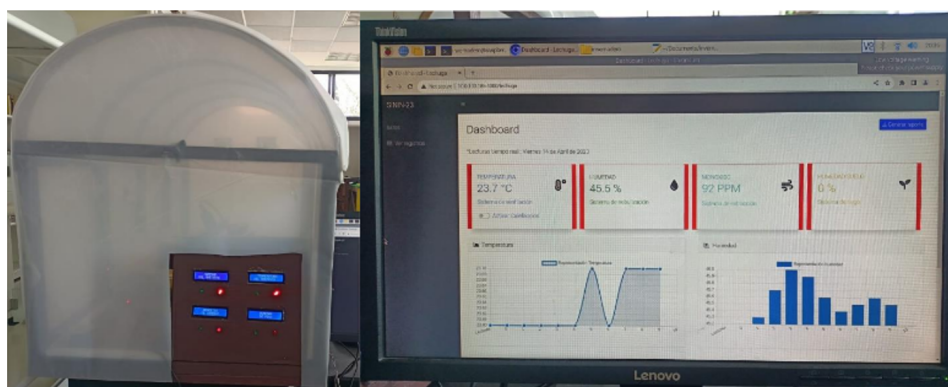
Dashboard para la visualización de datos y control de clima.



En la Figura 12 se muestra el diseño del prototipado a escala, y una prueba cualitativa de medición en tiempo real obtenida de los sensores colocados en posiciones convenientes. Este Sistema de Control de Clima brinda la posibilidad de poder visualizar en tiempo real y almacenar los datos en la interfaz gráfica o puede observarse directamente y en tiempo real en el panel físico. El panel físico mediante luces y sonidos permite al usuario percibir cualquier anomalía con los parámetros que se desean controlar y verificar el correcto funcionamiento del sistema con alertas sonoras o destellos lumínicos.

Figura 12.

Implementación y funcionamiento del sistema de control de clima.



El prototipo mostró funcionamiento estable a nivel cualitativo durante la demostración en laboratorio, permitiendo visualizar datos en gráficos y tablas en tiempo real y exportar registros en formato CSV. No obstante, la evidencia presentada es todavía preliminar, porque no se incluyen series temporales extensas, métricas de estabilidad de lectura, errores de medición ni un protocolo cuantitativo de validación del sistema.

Dado que no se realizó una comparación económica formal con soluciones comerciales, no es posible afirmar reducciones de costos operativos ni ventajas económicas cuantificadas. En consecuencia, las contribuciones del trabajo se limitan al diseño, la integración funcional y la demostración preliminar del prototipo, identificándose como líneas futuras la incorporación de sensores industriales, el fortalecimiento de la evidencia experimental y la ampliación del catálogo de cultivos.

4. Conclusiones

Se diseñó e implementó un prototipo a escala de un sistema de control climático automatizado de bajo costo para invernaderos, basado en Arduino, Raspberry Pi y sensores comerciales de bajo costo. Los resultados obtenidos muestran viabilidad funcional en condiciones de laboratorio para la adquisición, transmisión, almacenamiento y visualización de datos ambientales, así como para el accionamiento manual de actuadores.

No obstante, el estudio presenta limitaciones importantes. La evaluación realizada fue cualitativa, no se aplicó un protocolo cuantitativo de validación y no se efectuaron mediciones de error, estabilidad o tiempo de respuesta. Tampoco se desarrolló una comparación experimental entre estrategias de control ni un análisis económico frente a soluciones comerciales.

Como trabajo futuro se recomienda realizar pruebas de campo en invernaderos reales, incorporar métricas cuantitativas de desempeño, comparar estrategias de control On-Off, PID y difusas, y desarrollar una evaluación económica que permita determinar con mayor rigor la viabilidad de adopción del sistema.

Declaración de disponibilidad de datos

Los autores declaran que los datos utilizados en este estudio se encuentran descritos en el manuscrito y debidamente citados a lo largo del documento. Asimismo, las fuentes de los datos están disponibles en la sección de referencias, con el fin de garantizar la transparencia y la reproducibilidad de los resultados.

Declaración sobre el uso de IA generativa y tecnologías asistidas por IA en el proceso de redacción

El manuscrito no utilizó IA generativa en ninguna etapa.

Declaración de contribución de los autores CRediT

Raudel Flores-Moreno: redacción del artículo, diseño y desarrollo del prototipo a escala, modelación en 3D del modelo estructural. **Edurnet Jhaquelin Luna-Becerril:** diseño de diagrama de flujo, establecimiento de la base de datos, creación de interfaz web. **Ernest Yasser Núñez-Betancourt:** administración y supervisión (coordinación), maquetación y formato del documento final. **Omar Peña-Sosa:** análisis y revisión.

Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaran que no tiene ningún interés financiero ni relación personal que pudiera influir en el trabajo descrito en este artículo.

5. Referencias

- Aosong Electronics (s.f.). *DHT22 Digital Temperature & Humidity Sensor* [Hoja de datos]. Recuperado 20 de octubre de 2023. Available from: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2021). *Agtech en México: Panorama y Potencial*. Available from: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Agtech-en-Mexico-Panorama-y-Potencial.pdf>
- Barón Alarcón, J. E., & Pérez Orozco, D. F. (2016). *Invernadero de riego y temperatura controlado remotamente desde el web basado en tecnologías móviles* [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional UDFJC, Available from: <http://hdl.handle.net/11349/4596>
- Barroso García, A. (2015). *Control y monitorización de un invernadero a través de una aplicación móvil* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio Institucional UPM. Available from:

<http://hdl.handle.net/10803/320328>

- Boonyopakorn, P., & Thongna, T. (2020). Environment monitoring system through LoRaWAN for smart agriculture. In *2020-5th International Conference on Information Technology (InCIT)*, pp. 12-16. IEEE. <https://doi.org/10.1109/InCIT50588.2020.9310977>
- Embrapa Instrumentação. (2019). *Estação Meteorológica de Baixo Custo: uma tecnologia social para o Semiárido*. Comunicado Técnico 66. Embrapa. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/password-login>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2023). *Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Production*. Available from: <http://www.fao.org/3/cb5330en/cb5330en.pdf>
- Gunko, S., Trynchuk, O., Naumenko, O., Podpriatov, H., Khomichak, L., Bober, A., Zavorodnii, V., Voitsekhivskiy, V., Zavadskaya, O., & Bondareva, L. (2021). The effect of carbon dioxide on the quality of the mushrooms. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, *15*, 1018–1028. . Available from: <https://doi.org/10.5219/1634>
- IEEE Standards Association (2023). *Standard for Harmonization of Internet of Things (IoT) Devices and Systems in the Agricultural Domain*, p1451.99. Available from: <https://standards.ieee.org/ieee/1451.99/10880/>
- IFT, Instituto Federal de Telecomunicaciones (2024). *Estudio de Cobertura de Servicios de Telecomunicaciones en Localidades Rurales de México, 2024*. [Informe técnico]. Available from: <https://www.ift.org.mx/>
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (2020). Más rentable producir jitomate orgánico en invernadero que Cetes. [Folleto técnico]. México Campo. Available from: <https://www.mexicampo.com.mx/mas-rentable-producir-jitomate-organico-en-invernadero-que-cetes/#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20de%20jitomate%20org%C3%A1nico,superior%20al%2025%20por%20ciento>
- Júnior, J. A. G., de Almeida, M. J. B., & da Silva, L. C. P. (2024). Layered architecture of IoT-based precision agriculture system. In: *Proceedings of the 2024 7th International Conference on Bio-engineering for Smart Technologies (BioSMART)** (pp. XX-XX). IEEE. Available from: <https://doi.org/10.1109/BioSMART61328.2024.10630511>
- Kalman, R. E. (1960). Contributions to the theory of optimal control. *Boletín de la Sociedad Matemática Mexicana*, *5*(2), 102-119. Available from: <https://www.jstor.org/stable/1960054>
- Lawrence P. & Ortega J. M. (2019). Banco Interamericano de Desarrollo (BID) Agricultura protegida en México. Secretaría de agricultura y Desarrollo Rural. Elaboración de la metodología para el primer bono verde agrícola certificado. Available from: https://www.greenfinancelac.org/wpcontent/uploads/2019/11/Agricultura_protegida_en_M%C3%A9xico_Elaboraci%C3%B3n_de_la_metodolog%C3%ADa_para_el_primer_bono_verde_agr%C3%ADcola_certificado_es.pdf
- Li, L., Wang, L., Liu, C., Wang, Z., & Luo, T. (2023). A lightweight model for wheat ear fusarium head blight detection based on RGB images. *AgriEngineering*, *5*(2), 78–92. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5020008>
- Marín-García, E., Torres-Marín, J. N., & Chaverra-Lasso, A. (2023). Smart Greenhouse and Agriculture 4.0. *Revista científica*, (46), 37-50. Available form: <https://doi.org/10.14483/23448350.19816>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), (2022). “El estado mundial de la agricultura y la alimentación”, Available from: <https://doi.org/10.4060/cb9479es>
- Perilla, G. A., & Mas, J. F. (2019). High-resolution mapping of protected agriculture in Mexico, through remote sensing data cloud geoprocessing. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1), 532–541. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1686430>
- Resh, H. M. (2022). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower* (8th ed.). CRC Press. Available from: <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1686430>

org/10.1201/9781003282239

- Saleh, M., Elhajj, I. H., Asmar, D., Bashour, I., & Kidess, S. (2016). Experimental evaluation of low-cost resistive soil moisture sensors. In *2016 IEEE International Multidisciplinary Conference on Engineering Technology (IMCET)*, (pp. 179-184). IEEE. . Available from: doi: 10.1109/IMCET.2016.7777448
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). *Censo Agrícola* (2023). *Invernaderos en México*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Available from: <https://www.gob.mx/agricultura%7Cdgsiap/es/articulos/agricultura-prottegida-presente-en-30-estados-del-pais>
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Bafort, B.L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *PNAS*, 108(50), 20260–20264. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Tovar-Quiroz, A. D. (2023). Agricultura 4.0: uso de tecnologías de precisión y aplicación para pequeños productores. *Informador técnico*, 87(2), 195-211. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9662987>
- Van Henten, E. J., Hemming, J., Van Tuijl, B. A. J., Kornet, J. G., Meuleman, J., Bontsema, J., & Van Os, E. (2002). An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses. *Autonomous robots*, 13(3), 241-258. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1020568125418>
- Verdouw, C., Wolfert, S., & Goorman, I. (2021). Internet of Food and Farm 2020: Towards a European Ecosystem of Smart Agri-Food Applications. Available from: <https://cordis.europa.eu/project/id/731884>
- Zhang, P., Yang, L., & Li, D. (2020). EfficientNet-B4-Ranger: A novel method for the recognition of greenhouse cucumber diseases under natural complex environment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 176, 105652. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105652>