



Prototipo de Sistema de Cultivo en Interiores para la Germinación de Semillas con Monitoreo y Control en la Web Utilizando un Microcontrolador ESP32 y Protocolo MQTT

Machado-Díaz, E.¹✉; Barrón-Quintero, A.O.H.¹; Martínez-Sandoval, H.J.¹

Datos de Adscripción:

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Ingeniería en Sistemas Automotrices, Av. Tecnológico No. 1555 Sur Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Estado de Durango C.P. 35150.

✉ eduardo.md@itslerdo.edu.mx

Resumen - El cultivo interior (indoor por su nombre en inglés), se refiere a la práctica de cultivar plantas, especialmente aquellas que son comestibles como vegetales, hierbas y frutas, en un entorno controlado dentro de un espacio cerrado, como una casa, un apartamento o un invernadero. El presente proyecto presenta el diseño, desarrollo e implementación de un prototipo de sistema de germinación de semillas automatizado con monitoreo de variables físicas en la web con la finalidad de que éstas puedan ser visibles desde cualquier lugar con acceso a internet. En primer lugar, se describe el proceso de diseño de la estructura del sistema a través de Diseño Asistido por Computadora (CAD) mediante el software Fusion 360 de Autodesk en su versión de licencia educativa para su fabricación mediante impresión 3D. Así mismo, se presenta el proceso de desarrollo de los circuitos electrónicos para la adaptación de los sensores para la medición de temperatura, humedad, nivel de agua y sensibilidad de luz. Posteriormente se da una explicación de la programación del sistema en el microcontrolador a través de un ESP32 para la conectividad con la página web desarrollada en el entorno Node-RED® utilizando el protocolo MQTT para el intercambio de información. El presente trabajo se plantea como base para el posterior desarrollo de aplicaciones de cultivo en interiores en semillas de verduras de bajos requerimientos, pues se concluye que es posible crear prototipos de bajo costo y adaptado a las necesidades de diferentes sectores sociales y académicos.

Palabras Clave - Automatización, Control ambiental, Germinación, Monitoreo, Prototipo

Abstract - Indoor cultivation refers to the practice of growing plants, particularly edible ones such as vegetables, herbs, and fruits, in a controlled environment within an enclosed space, such as a house, apartment, or greenhouse. This project presents the design, development, and implementation of a prototype automated seed germination system with web-based monitoring of physical variables, enabling visibility from any location with internet access. Firstly, the design process of the system's structure is described using Computer-Aided Design (CAD) with Autodesk's Fusion 360 software under an educational license, for fabrication through 3D printing. Additionally, the development process of electronic circuits for sensor

adaptation to measure temperature, humidity, water level, and light sensitivity is presented. Subsequently, the system's programming on the microcontroller via an ESP32 is explained, enabling connectivity with the web page developed in the Node-RED® environment using the MQTT protocol for information exchange. This work serves as a foundation for the further development of indoor cultivation applications for low-requirement vegetable seeds, concluding that it is feasible to create low-cost prototypes adapted to the needs of different social and academic sectors.

Keywords - Automation, Environmental control, Germination, Web monitoring, Prototype, Sensors.

I. INTRODUCCIÓN

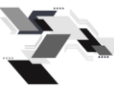
1.1 Introducción al cultivo interior

En la actualidad, la agricultura y la tecnología han evolucionado de la mano mediante la automatización de los procesos. Tal es así, que el diseño de sistemas autónomos en procesos agrícolas se ha convertido en un área de creciente interés e innovación tanto para grandes cultivos como para el cultivo doméstico (Murciano, 2019).

El cultivo doméstico ha experimentado un aumento considerable en la actualidad, impulsado por diversos factores como la creciente conciencia ambiental, la búsqueda de alimentos frescos y saludables, y la disponibilidad de tecnologías y conocimientos accesibles. Esta tendencia se ha visto reflejada en el aumento en la creación de huertos urbanos, jardines verticales y sistemas de cultivo en interiores, tanto en hogares como en comunidades donde se tienen las condiciones necesarias para ello (de Castro, 2024).

El cultivo interior (*indoor* por su nombre en inglés), se refiere a la práctica de cultivar plantas, especialmente aquellas que son comestibles como vegetales, hierbas y frutas, en un entorno controlado dentro de un espacio cerrado, como una casa, un apartamento o un invernadero. Este método de cultivo ha ganado popularidad debido a sus ventajas en términos de control ambiental, eficiencia de recursos y disponibilidad durante todo el año.

Derivado de lo anterior, se ha generado mucha información sobre las bases para la germinación de alimentos básicos. Sin embargo, así como se puede obtener el conocimiento a partir de la globalización de la información por internet o en la literatura convencional, se presentan problemáticas que evitan que esta tarea pueda realizarse de forma exitosa. Una de las principales es la falta de tiempo de las personas que quieren incursionar en él o el desconocimiento de las variables básicas que intervienen en los procesos agrícolas sobre todo en el de germinación con el cual comienza el crecimiento de las plantas.



Es por ello que es necesario generar tecnología de fácil acceso que permita a las personas que deseen incursionar en el cultivo en interiores, tener una ayuda en el control de variables físicas críticas para el crecimiento de las semillas con el propósito de que, una vez germinadas, puedan ser trasplantadas en recipientes más grandes para la cosecha, en el caso de comestibles o para su presentación en aquellas que sean para usos ornamentales.

El presente artículo presenta el diseño, desarrollo e implementación de un prototipo de sistema de germinación de semillas automatizado con monitoreo de variables físicas en la web con la finalidad de que éstas puedan ser visibles desde cualquier lugar con acceso a internet. Esto derivado del uso generalizado de smartphones que ha tenido un impacto significativo en el acceso a internet, ya que muchas personas utilizan sus dispositivos móviles como principal medio de conexión en lugar de computadoras de escritorio o portátiles.

1.2 Antecedentes

A causa de la creciente preocupación por el medio ambiente y el consumo de alimentos sin conservadores o fertilizantes que puedan poner en riesgo la salud, se han realizado una gran cantidad de investigaciones de sistemas automáticos de riego. Ejemplos de estas aplicaciones, y que están enfocados en el presente proyecto se presentan a continuación.

El sistema desarrollado por Guijarro (Guijarro-Rodríguez, 2018), presenta como problemática la poca disponibilidad de las personas para mantener hidratados los cultivos o jardines domésticos. La metodología descrita tiene como finalidad el desarrollo de software para aplicaciones móviles y un hardware basado en la plataforma Arduino®, todo esto basándose en el análisis de cultivos de huertos domésticos. Sin embargo, el sistema no fue implementado en su totalidad y solamente se realizaron pruebas básicas del funcionamiento de los sensores de las variables de humedad, temperatura y luminosidad para que sirva como iniciativa en la implementación de este tipo de sistemas.

Existen también trabajos como el realizado por Quispe Tapara (2018), que aplicó un sistema automático de riego en un vivero que tenía la necesidad de controlar los parámetros de los cultivos ya que presentaban anomalías a lo largo del cultivo de café. El autor menciona que los factores principales son el escaso control en los tiempos de riego, el cambio climático y el tiempo que dedicaban los encargados a realizar el mantenimiento a los cultivos para que las plantas se desarrollaran.

Se presenta como alternativa un sistema de riego basado en la plataforma Arduino® con sensores de humedad, luz y temperatura que son los parámetros principales que se tenían que controlar. Como interfaz visual se utiliza un programa basado en Processing® que permitía el control. La investigación se centra en el estudio de los factores determinantes en el desarrollo de las plantas a través de metodología cuantitativa y basada en la experiencia de los trabajadores lo que da pie a un proceso de mejora basado en la experimentación.

Los anteriores sistemas presentan alternativas en cuanto al hardware, el software y las características principales que deben de monitorearse. Una investigación que implementó sistemas y tuvo monitoreo en la web es el presentado por (Castro Popoca, 2008). El artículo tiene como objetivo implementar un riego

automatizado en tiempo real para determinar el momento oportuno y la cantidad de riego a través de tecnologías de la información.

El sistema está basado en un datalogger CR10X y considera tres estrategias de riego basadas en estudios realizados de forma cuantitativa. Los resultados fueron favorables ya que se disminuyó el consumo de agua y se diseñaron estrategias para la mejora del programa de riego y del monitoreo de anomalías que pudieran presentarse.

Un trabajo similar, pero con hardware más accesible y de uso libre lo presenta (Calderón Vargas, 2015) que combina las prestaciones de la plataforma Arduino® con una placa de tipo YUN® que contiene comunicación a través de ethernet. Tenía como objetivo mejorar las condiciones de cultivos en Ciudad Juárez, Chihuahua en México que es una zona semidesértica en la cual, la falta de agua, juega un factor importante en el desarrollo de productos agrícolas. Se utilizaron sensores para la humedad ambiental, humedad en el sustrato, temperatura ambiente y válvulas de control a través de solenoides y relevadores. La interfaz fue una página web programada en Java Script® que se comunica con la placa Arduino YUN®. Lo anterior fue implementado en un prototipo de cultivo con una sola planta teniendo resultados favorables.

Centrados ya en el cultivo interior se tiene el sistema propuesto por (Murciano Carretero, 2019) que propone un prototipo para la germinación de plantas de fresa. El proyecto presenta estudios de las variables para la producción de este fruto con la finalidad de establecer los parámetros necesarios en el sistema. La metodología utilizada se basa en sensores industriales y, a diferencia de los proyectos antes mencionados, hace referencia a la importancia de la luminosidad en las plantas de fresas, y en general, de todos los cultivos, siendo importante el monitoreo y control de esta variable en sistemas indoor.

Siguiendo en la temática de cultivos interiores se tiene también el trabajo presentado por (Varona Anta, 2022). La investigación se llevó a cabo a partir de la pandemia de COVID-19, en donde, de acuerdo a los estudios realizados por la autora, existe un incremento en el consumo de alimentos más saludables a través de micro brotes que pueden cultivarse en espacios reducidos y con pocos recursos. Así mismo, se centra en el estudio de plantas que tienen un corto ciclo de germinación.

En la Universidad de la República en Uruguay (Menoni, 2023) se creó un sistema de cultivo Indoor para la producción de Cannabis. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo de un sistema de monitoreo y control aplicado a un invernadero de cannabis para producción indoor. Se incluye el análisis realizado para identificar las variables relevantes que deben ser monitoreadas y la selección de procesos a ser automatizados.

Además, se describe el desarrollo de una red inalámbrica que consta de una serie de sensores para diferentes variables y un conjunto de actuadores distribuidos. Estos componentes, registran las variables del proceso y proporcionan información que se almacena en una base de datos y se visualiza a través de una interfaz de usuario.

Las variables monitoreadas incluyen la humedad y temperatura del suelo, la humedad y temperatura ambiente, la concentración de CO₂, el estado de la luz y el nivel de pH del agua.

A partir de los antecedentes presentados, se puede observar una tendencia en el aumento de sistemas de cultivos en interiores que derivan de la demanda de la población actual en alimentos de mejor calidad y de bajos requerimientos.

En la mayoría de la bibliografía consultada (Calderón Vargas, 2015), se comparten parámetros necesarios para llevar a cabo esta tarea como lo son la humedad, la temperatura, la luminosidad y el PH. De igual forma, se obtuvieron diferentes tipos de sensores que pueden utilizarse para el desarrollo de estos sistemas.

1.3 Problemática a resolver

Los cultivos indoor han aumentado en popularidad a raíz de diversos factores, entre los principales se pueden mencionar: el aumento en la preocupación de la población por una mejor alimentación y la creciente agenda en cuestiones de desarrollo sostenible.

Si bien el cultivo en interiores se presenta como una idea para subsanar estos problemas, se tienen diferentes factores que limitan su aplicación. Por ejemplo, la dificultad para mantener los parámetros de germinación de las semillas de los cultivos ya que éstos son sensibles a la variación en la temperatura y la humedad. Un sistema de control del ambiente es crucial para asegurar las condiciones ideales para la germinación.

Otra de los inconvenientes, enfocados en cultivos en hogares, tiene un monitoreo ineficiente de los sistemas pues la mayoría son manuales y dependen del conocimiento, disponibilidad y recursos que tienen las personas que desean incursionar en este tipo de cultivos. Esto deriva también en problemas de riegos inadecuados, es decir, no se tiene un equilibrio en la humedad del sustrato, indispensable para el crecimiento ideal de las semillas.

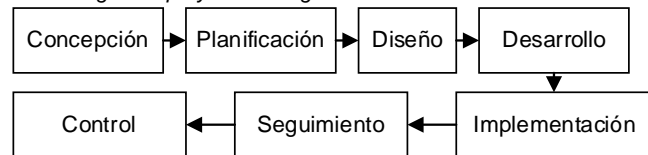
Un problema que se presenta en la Comarca Lagunera de Durango, es el clima semidesértico y el déficit de agua en la zona lo que demanda un control exhaustivo del uso de recursos hídricos para disminuir el gasto de agua y el desarrollo de sistemas sostenibles de mejor calidad.

El presente proyecto pretende dar una alternativa de solución a los problemas antes mencionados, brindando un prototipo que sea de bajo costo, fácil implementación y que monitoree las variables principales en el desarrollo de las semillas utilizadas en cultivos indoor como lo son: temperatura, humedad ambiental, humedad en el sustrato y la luminosidad. De igual forma, se pretende atacar el inconveniente del monitoreo fuera de donde se ha desarrollado el sistema, es decir, que la visualización de las variables se almacene y esté disponible en la web.

También el prototipo tiene el potencial de mejorar significativamente la eficiencia y la tasa de éxito en la germinación de semillas, tanto para huertos caseros como para aplicaciones profesionales en agricultura y viveros una vez que se ha validado el funcionamiento del sistema en general, así como de los parámetros seleccionados.

implementación y seguimiento. A continuación, en la Figura 1, se presentan las fases típicas de la metodología anteriormente descrita.

Figura 1.
Metodología del proyecto de ingeniería



Estas fases proporcionan una estructura organizada para la ejecución de proyectos de ingeniería aplicada, asegurando una gestión eficiente, resultados satisfactorios y cumplimiento de los objetivos planteados.

2.2 Concepción de la investigación

La necesidad del proyecto recae en resolver la problemática del monitoreo de datos ambientales y variables naturales que son esenciales en la germinación de cultivos en interiores, así como mejorar los métodos de riego de los mismos a partir de la aplicación de diversas tecnologías de vanguardia que faciliten la fabricación y la implementación del prototipo.

Las principales características que se buscan aplicar en el proyecto presentado son las siguientes:

- Bajo costo de implementación.
- Uso de herramientas de hardware y software libre.
- Manejo de sensores comerciales con la finalidad de dar un mejor mantenimiento a los sistemas físicos.
- Monitoreo de los datos en tiempo real en la computadora personal.
- Diseño de una interfaz visual para la visualización y adquisición de datos en la web.
- Diseño compacto para no requerir mucho espacio en los interiores en los que va a ser aplicado.
- Sistema de riego semiautomático para mejorar el manejo del agua en la germinación de las semillas.

Lo anterior descrito se definió a partir de las problemáticas, resultados y conclusiones de la bibliografía analizada, así como de los perfiles de los participantes en el mismo. En el esquema de la

Figura 2, se presenta el panorama general de proyecto en su concepción.

Figura 2.
Esquema general del proyecto

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Metodología de proyecto de ingeniería.

Para este proyecto se utilizó la metodología de ingeniería aplicada que consiste en pasar por diversas fases que siguen un proceso sistemático, desde la concepción de la idea hasta su



2.3 Planificación del sistema

Con base a lo establecido en el apartado de concepción se planificó el desarrollo en cuatro etapas principales que se observan en la Figura 3

Figura 3.
Etapas de planificación del sistema



En la primera etapa, se definieron los sensores con los que se trabajó, éstos deben de tener un bajo costo, relativamente fácil de implementar y de programar, así como de tener un tamaño reducido con la finalidad de optimizar los espacios a utilizar. Dentro de este apartado, se definió el método de fabricación, que se fue realizado a partir de manufactura aditiva mejor conocida como impresión 3D.

Posteriormente, con los sensores definidos, se realizó el diseño del prototipo a la medida de los componentes elegidos utilizando software asistido por computadora. En este caso, se realizó la interrogante si utilizar software con licencia o de uso educativo/libre.

La tercera etapa contempló el desarrollo de los circuitos acondicionadores de señal para los sensores, así como las conexiones de los mismos en un microcontrolador ESP32® que fue el elegido de acuerdo a sus características enfocadas en la comunicación inalámbrica ya sea por Wi-Fi, bluetooth o su mismo protocolo llamado ESPNOW

Por último, se programó la interfaz visual a través de herramientas que permitan el monitoreo y registro de datos en la web, así como la visualización en la computadora con comunicación Serial.

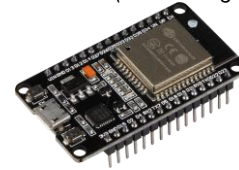
2.4 Hardware utilizado

2.4.1 ESP32

El ESP32 es un microcontrolador altamente versátil y potente que se utiliza en una variedad de aplicaciones, incluido el control de procesos en entornos automatizados. Su importancia en el control de procesos radica en su capacidad para gestionar y controlar una amplia gama de dispositivos y sensores, así como para ejecutar algoritmos de control de manera eficiente y confiable. Una imagen descriptiva se presenta en la Figura 4, que corresponde una placa DevKit1

Figura 4.

Microcontrolador ESP32 DEVKIT1(Fuente: Digikey)



Uno de los aspectos más destacados es la capacidad del microcontrolador para adquirir datos de sensores y dispositivos de manera precisa y oportuna. Esto es crucial en el control de procesos, ya que permite monitorear variables como temperatura, presión, flujo, nivel, entre otros, en tiempo real. La capacidad de adquisición de datos facilita la implementación de sistemas de control en tiempo real que pueden ajustar parámetros y tomar decisiones de manera dinámica en función de las condiciones del proceso (Pravalika, 2019).

Además, ofrece la posibilidad de comunicarse con otros dispositivos y sistemas a través de una variedad de interfaces como Wi-Fi, Bluetooth, SPI, I2C, entre otras. Esta capacidad de comunicación facilita la integración del ESP32 en entornos de control de procesos más complejos donde se requiere interacción con sistemas de supervisión, bases de datos, actuadores, entre otros componentes (Babiuch, 2019).

De acuerdo a las especificaciones anteriores, se presenta como una alternativa de bajo costo para la elaboración de la presente investigación.

2.4.2 Sensor DHT11

Es un sensor de temperatura y humedad diseñado para aplicaciones de monitoreo ambiental, este sensor puede medir la temperatura en un rango de 0 a 50 grados Celsius con una precisión de ± 2 grados Celsius, y la humedad relativa en un rango de 20% a 90% con una precisión de $\pm 5\%$. Utiliza un único bus de datos para la comunicación y puede ser implementado con microcontroladores como Arduino®, ESP32®, Raspberry Pi®, lo que lo hace popular en proyectos de electrónica y domótica donde se requiere medir la temperatura y humedad del entorno. El sensor se presenta en la Figura 5.

Figura 5.
Sensor de temperatura y humedad DHT11(Fuente: Digikey)



En sistemas de cultivo indoor, el uso del sensor DHT11 es bastante común para monitorear las condiciones ambientales dentro del entorno de cultivo. Por ejemplo, en sistemas de cultivo hidropónico o de cultivo en invernaderos controlados, se utiliza para medir la temperatura y humedad relativa del aire, lo que es de vital importancia para garantizar condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas tanto en entornos externos como controlados como el descrito en el presente artículo.

2.4.3 Resistencia dependiente de luz (LDR)

Es un componente electrónico que varía su resistencia eléctrica en función de la intensidad de la luz que recibe. Está

compuesto por una cerámica semiconductor que disminuye su resistencia cuando es expuesta a la luz como se ve en la Figura 6.

Figura 6.
Resistencia dependiente de luz (LDR) (Fuente: Adafruit)



Tomando sus características para el cultivo en interiores el LDR se utiliza como sensor de luz para monitorear la cantidad de iluminación que reciben las plantas

2.4.4 Sensor de humedad de sustrato.

El sensor HW-080 es un dispositivo utilizado para medir la humedad del suelo. Este tipo de sensor es especialmente relevante en aplicaciones agrícolas, de jardinería y de monitoreo ambiental, donde el contenido de humedad del suelo es un factor crítico para el crecimiento de las plantas y otros organismos vivos en el suelo, la composición del sensor se encuentra en la Figura 7.

Figura 7.
Electrodo del sensor HW-080 (Fuente: Adafruit)



El sensor HW-080, generalmente consta de dos electrodos que se insertan en el suelo. Estos electrodos están conectados a un circuito que mide la resistencia o conductividad entre ellos que, para este caso, estaría conectado a un acondicionador de señal proveniente del fabricante para posteriormente ser ingresado por un canal del convertidor analógico – digital del ESP32.

El funcionamiento básico de un sensor de humedad en tierra implica la detección de cambios en la conductividad eléctrica del suelo, que varía en función de la cantidad de agua presente en el suelo. Cuanto más húmedo esté el suelo, mayor será su conductividad eléctrica, y viceversa.

Su aplicación en el prototipo es la base para la detección de cambios en la humedad del sustrato y realizar el control de la misma a través de la programación del microcontrolador y la interfaz visual.

2.4.5 Sensor VL540x

El sensor VL53L1X es un sensor de distancia láser de alta precisión diseñado para medir distancias de manera precisa y rápida en una variedad de aplicaciones. Utiliza tecnología de tiempo de vuelo (ToF) para calcular la distancia entre el sensor y el objeto objetivo. La Figura 8, muestra una imagen del sensor en cuestión.

Figura 8.
Sensor VL5310X(Fuente: Digikey)

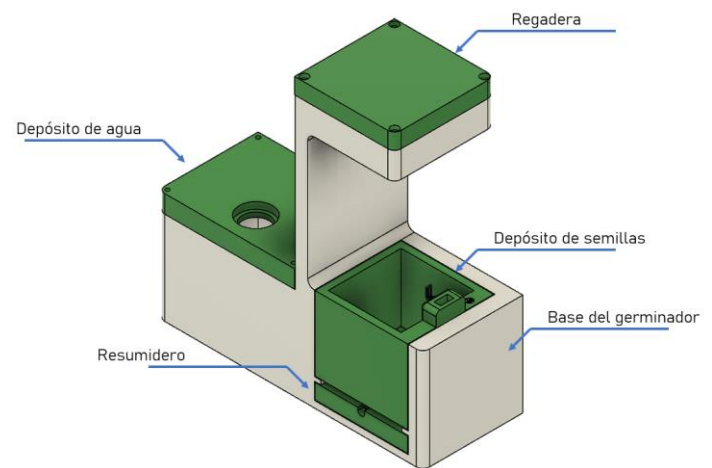


Es especialmente notable por su capacidad de medir distancias de hasta varios metros con una alta resolución y precisión, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren detección y seguimiento de objetos en movimiento o que necesitan medidas precisas de distancias.

2.5 Diseño y manufactura del prototipo.

Se realizó el diseño del prototipo a través del software especializado Fusion 360® con licenciamiento de estudiante. El diseño está dividido en 5 partes principales que se muestran en la Figura 9.

Figura 9.
Estructura general del prototipo de germinador en Fusion 360®



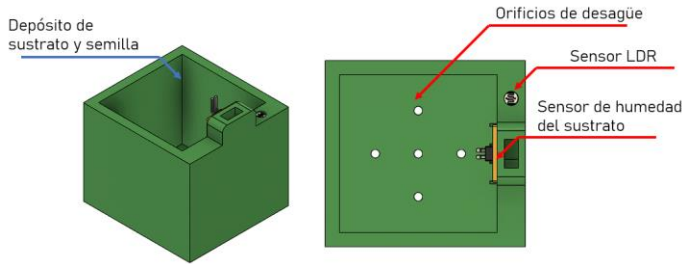
Entre las especificaciones de diseño se tienen:

- Piezas con formas regulares con la finalidad
- Las piezas deben de ser, en medida de lo posible, fácilmente ensamblables.
- Tamaño reducido para ocupar menos espacio en el interior donde se va a aplicar.

2.5.1 Diseño del depósito de semillas

El depósito de semillas es el núcleo del prototipo, en este lugar es donde se va a colocar el sustrato que va a sostener el cultivo mientras se da su germinación. En esta pieza se tienen colocados el sensor de humedad de tierra y la medición de la intensidad de la luz. El diseño del depósito de semillas se ve en la Figura 10.

Figura 10.
Diseño del depósito de sustrato y semilla en Fusion 360®



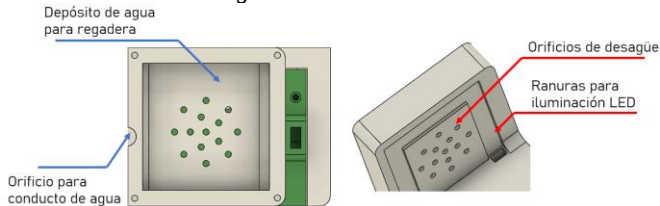
La ubicación de los sensores en la estructura está estratégicamente definida para que la medición de los parámetros sea lo más fiable posible. Así mismo, se encuentran hechos al calce para que los elementos de medida no tengan movimiento que puedan generar errores en las señales.

2.5.2 Diseño de la regadera y sistema de iluminación.

Para el apartado del riego automático se definió una regadera en la parte superior del depósito de sustrato y semilla para que el agua fuera distribuida lo más uniformemente posible dentro de las especificaciones de diseño. También, se tiene un sistema de iluminación LED para cuando sea necesario controlar esta variable. El diseño se ve en la

Figura 11.

Figura 11.
 Diseño del sistema de regadera e iluminación en Fusion 360®

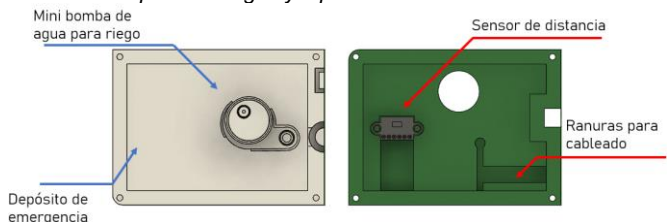


De igual forma, se tienen orificios equidistantes y centrados con la caja de depósito y el orificio para el conducto de agua proveniente de la bomba.

2.5.3 Diseño del depósito de agua.

El sistema de riego se basa en un depósito de aproximadamente 300 mililitros de reserva que fungirá como sistema emergente en caso de que no se pueda realizar de forma manual. Se tiene una forma cuadrada para mejor cálculo del volumen del líquido. En la Figura 12, se presenta el diseño del depósito y la ubicación de la bomba.

Figura 12.
 Diseño del depósito de agua y tapa con sensor en Fusion 360®



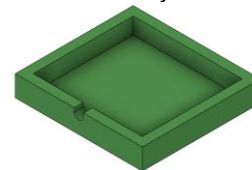
Con la finalidad de tener una retroalimentación de si el depósito se encuentra vacío se colocó un sensor de distancia láser con el

que se pueda calcular de forma aproximada el agua que se tiene actualmente e impedir que la bomba funcione en vacío.

2.5.4 Resumidero.

Al tener orificios de desagüe en el depósito de sustrato y semillas se colocó un resumidero que permita contener el agua que se filtre de la parte superior. Por cuestión de diseño, se implementó de poca capacidad como se ve en la Figura 13.

Figura 13.
 Resumidero para depósito de sustrato y semilla en Fusion 360®



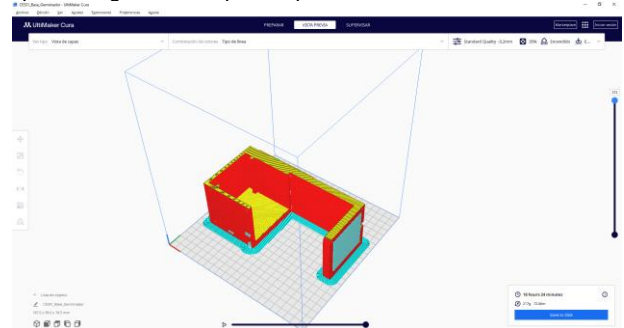
Este sistema no se tiene retroalimentación en cuanto al nivel del agua del depósito de sustrato y semilla, siendo necesario que el usuario supervise la capacidad del mismo. Si bien su desborde no causa daños al sistema, si puede realizarlo en la ubicación donde se encuentre.

2.5.5 Implementación del diseño con impresión 3D.

Una vez que se tienen los diseños de las piezas y el ensamble de las mismas, se procede a generar el código para su fabricación en impresión 3D. Después de un análisis de las características del diseño, se definió al PETG como material de impresión pues tiene una alta capacidad de soportar temperaturas altas (conveniente en la zona donde se va a aplicar), así como poca o nula filtración de líquido al menos en materiales de bajo costo.

El software usado para la segmentación de las piezas fue Ultimaker Cura® en donde se colocan las especificaciones de la fabricación y se genera el código G que entiende la impresora. Un ejemplo de segmentación se ve en la Figura 14.

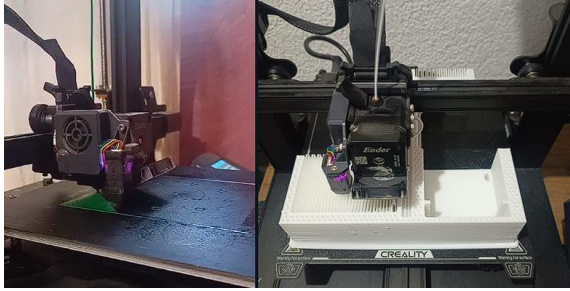
Figura 14.
 Ejemplo de segmentación para impresión 3D en Ultimaker Cura®



Posteriormente, se llevó a cabo la impresión de todas las piezas. Un ejemplo de este proceso se muestra en la

Figura 15.

Figura 15.
 Proceso de fabricación por impresión 3D



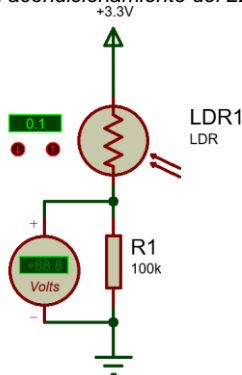
2.6 Diseño del circuito electrónico.

Una vez que se ha finalizado con la fabricación de la estructura se procedió con el diseño del circuito de control cuya pieza principal es el microcontrolador ESP32.

2.6.1 Acondicionamiento de la LDR

La LDR es una resistencia, por lo que es necesario realizar un acondicionamiento de señal que permita convertir esta variable a voltaje, pues éste es el que es leído por el conversor análogo – digital del ESP32. El circuito diseñado para esta tarea es un divisor de voltaje que se muestra en la Figura 16.

Figura 16.
 Diseño esquemático del acondicionamiento del LDR en Proteus®



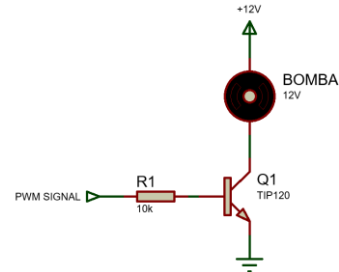
El voltaje de salida está dado por (1) que corresponde al análisis de un divisor de voltaje. La alimentación es de 3.3V pues es la tensión soportada por el microcontrolador ESP32®

$$V_o = \left(\frac{R_1}{R_{LDR} + R_1} \right) \cdot 3.3V \quad (1)$$

2.6.2 Circuitos de amplificación de corriente

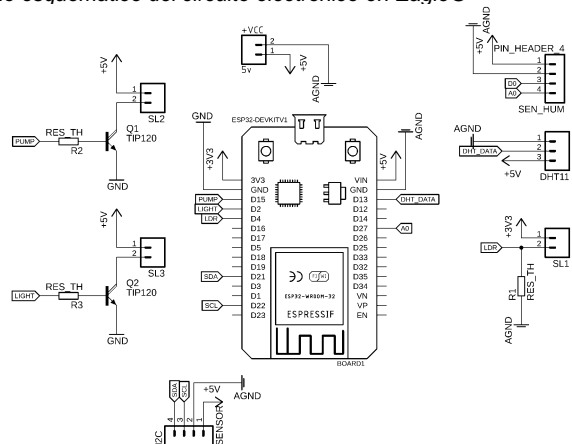
Consta de dos transistores de potencia TIP120 que serán los encargados del control de corriente de la iluminación y de la bomba de agua del depósito. Los transistores se encuentran trabajando en modo corte – saturación a partir de circuitos típicos de conexión con microcontroladores en emisor común como se muestra en la Figura 17. De igual forma se encuentran conectados a salidas PWM con la finalidad de modificar la potencia de salida del circuito.

Figura 17.
 Diseño esquemático del circuito de potencia en Proteus®



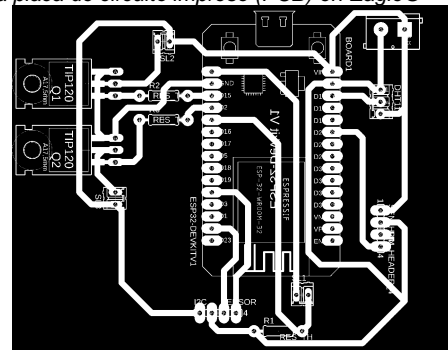
Así mismo, cuenta con conectores tipo JST para la conexión rápida de los sensores tanto de temperatura y humedad como del ultrasónico para el senado del nivel del tanque de agua. Para la LDR, se tiene un divisor de tensión conectado a un canal análogo – digital del ESP32 ®. Éstos últimos elementos funcionan a partir de protocolos de 2 hilos por lo que no requieren un acondicionamiento específico de señales. El esquemático general del proyecto se ve en la Figura 18.

Figura 18.
 Diseño esquemático del circuito electrónico en Eagle®



Posteriormente, del circuito esquemático se diseñó la placa de circuito impreso en caso de que se requiera ser fabricada, esta se muestra en la Figura 19.

Figura 19.
 Diseño de la placa de circuito impreso (PCB) en Eagle®

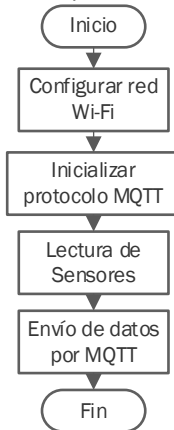


2.7 Algoritmos de programación

El algoritmo de programación se divide en dos partes: la primera corresponde a la realizada en el microcontrolador y la segunda la desarrollada en la interfaz visual en Node-Red®. En

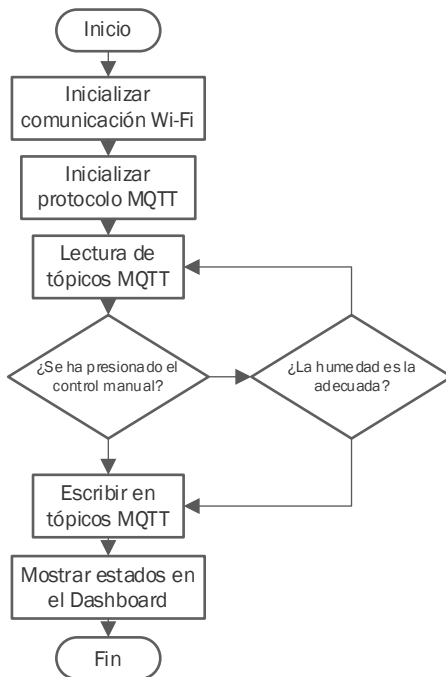
la Figura 20, se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento básico del microcontrolador.

Figura 20.
Diagrama de flujo del algoritmo implementado en el ESP32®



En la Figura 21, se visualiza el diagrama de la , se presenta el algoritmo en diagrama de flujo del funcionamiento de la interfaz visual en Node-Red®. En donde se tienen dos modos de funcionamiento, el manual con controles mediante el dashboard y una automática que realiza un control on – off a través de la medición de humedad en el sustrato.

Figura 21.
Diagrama de flujo del algoritmo implementado en Node-RED®



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

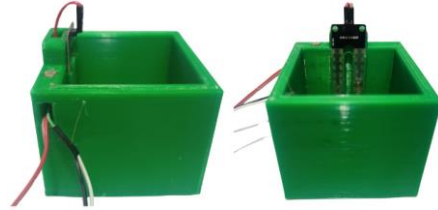
3.1 Montaje de la estructura del germinador

Una vez que se tuvieron todas las piezas impresas se comenzó con el ensamble físico de los componentes. En primer

lugar, se colocaron los sensores de luz y de humedad del sustrato en la caja de germinación.

Para el cableado se usaron conductos internos de la pieza para guiar a los conductores por un camino que no pusiera en riesgo la manipulación ya que, hay que recordar, que se va a trabajar con líquidos y se necesita evitar contacto con la corriente eléctrica. La Figura 22, muestra la caja de germinación montada y la ubicación de los sensores.

Figura 22.
Caja de germinación fabricada y sensores montados



Posteriormente, se montó la estructura base del germinador como se ve en la Figura 23. Al igual que el elemento anterior, se dejaron huecos para poder pasar el cableado electrónico.

Figura 23.
Estructura base del germinador montada



En la Figura 24, se puede observar el depósito de agua con la bomba colocada y el sensor en la parte superior en la tapa. Se tienen ranuras para el cableado y un orificio en la parte superior de la tapa para el llenado de agua cuando el tanque comienza a vaciarse.

Figura 24.
Montaje del depósito de agua.



3.1.1 Implementación del protocolo MQTT

El protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es un protocolo de mensajería ligero y sencillo, diseñado

principalmente para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT). Utiliza un modelo de comunicación publicador/suscriptor, donde los dispositivos o aplicaciones (clientes) pueden publicar mensajes en temas específicos y suscribirse a estos temas para recibir mensajes.

Los clientes se conectan al broker a través de TCP/IP, estableciendo parámetros de sesión y autenticación si es necesario. La publicación de mensajes se realiza en temas específicos, y el broker reenvía estos mensajes a los suscriptores correspondientes.

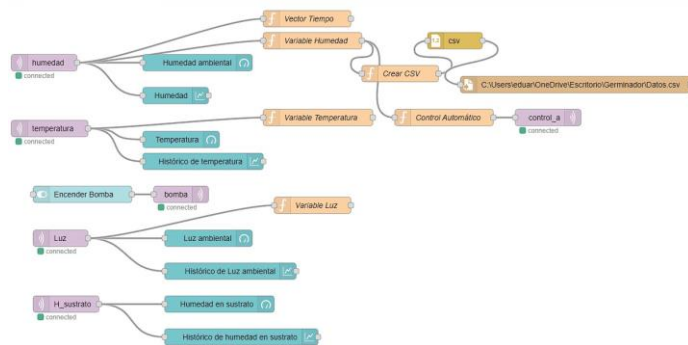
Para la implementación del protocolo en la web se diseñó un código en Node-RED® que se basa en la suscripción a tópicos de cada sensor. Es decir, cada sensor y actuador del sistema se encuentra etiquetado para que el broker pueda realizar el envío y recepción de datos, así como gestionar las suscripciones. La Tabla 1 muestra los tópicos requeridos para la adquisición de datos.

Tabla 1.
Relación de sensores y tópicos para implementación de MQTT

Sensor/actuador	Nombre de tópico
DHT11 (Temperatura)	Temperatura
DHT11(humedad)	Humedad_ambiental
Sensor HW-08	Humedad_sustrato
Fotorresistencia	Luz_ambiental
Bomba	Estado_bomba
VL530X	Nivel

La Figura 25., muestra la programación en Node-Red® para los elementos mencionados. Cada una de las funciones están realizadas en JavaScript, en donde el algoritmo principal es tomar el valor de los tópicos seleccionados y almacenarlos en variables globales que serán enviadas a un archivo separado por comas (CSV).

Figura 25.
Programación del Dashboard en Node-Red®



Para la implementación del control automático, se desarrolló un control On – Off básico presentado en el Código Fuente 1 que envía una señal por MQTT al ESP32® cuando la humedad está por debajo del 50%.

Código Fuente 1.
Programación del control On - Off

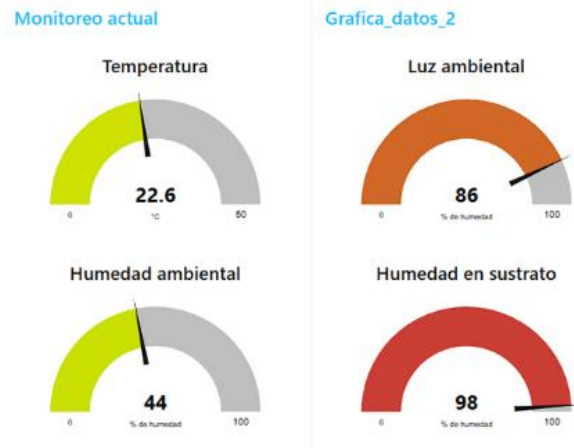
```

1 var humedad = global.get('humedad');
2 var control = false
3 if (humedad <= 50){
4   control = true;
5 }
6 else
7   control = false;
8 return control;
  
```

Con los tópicos identificados se diseñó e implementó la interfaz visual de la

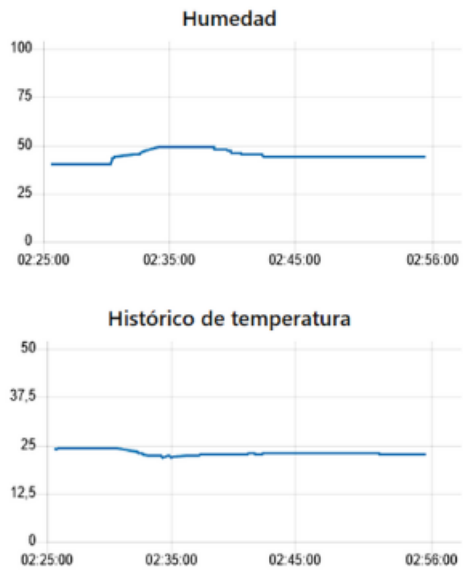
Figura 26. En ella se encuentran gráficamente a través de medidores de aguja las variables principales de monitoreo y también de forma numérica. También se encuentran botones para el encendido de las luces de forma manual o automática y de la bomba.

Figura 26.
Sensores tipo aguja y numéricos de las variables en Node-Red®



Para el análisis de los datos se tienen gráficas históricas que en un futuro permitirán realizar estudios de la relación que existen entre las variables ambientales y el crecimiento de la semilla a germinar. Ejemplos de históricos se muestran en la Figura 27.

Figura 27.
Ejemplo de gráficas históricas de variables.



Como ejemplo, se presentan las gráficas de la humedad y la temperatura. En la realización del experimento se encendió un aire lavado que disminuye la temperatura, pero a su vez, aumenta la humedad ambiental siendo un factor que puede influir en las condiciones controladas del sistema.

La interfaz visual completa se presenta en la Figura 28. Es importante mencionar que el servidor web se encuentra dentro de la red local de los autores del artículo por lo que es accesible para cualquier dispositivo al ingresar a la dirección IP correspondiente al equipo de cómputo donde se encuentra corriendo el programa de Node-RED®.

Figura 28.
Interfaz visual o dashboard del prototipo en Node-Red®



IV. CONCLUSIONES

En conclusión, el desarrollo del prototipo de sistema de cultivo en interiores para la germinación de semillas, con monitoreo y control en la web utilizando un microcontrolador ESP32 y el protocolo MQTT, demuestra el potencial significativo de la tecnología moderna para mejorar la agricultura urbana y promover prácticas sostenibles. La integración de software especializado, como Fusion 360, y técnicas de manufactura aditiva permitió diseñar y fabricar componentes precisos y personalizados, optimizando la funcionalidad y eficiencia del sistema. El uso del microcontrolador ESP32 y el protocolo MQTT facilitó la comunicación en tiempo real y la gestión eficiente de

datos, permitiendo que los posibles usuarios puedan monitorear y controlar las condiciones de cultivo de forma remota. Esto no solo aumenta la accesibilidad y conveniencia para los usuarios, sino que también contribuye a una mejor gestión de recursos, reduciendo el desperdicio y mejorando la productividad.

El impacto en la sociedad actual es notable, ya que este tipo de sistemas puede ser implementado en entornos urbanos, promoviendo la autosuficiencia alimentaria y reduciendo la dependencia de los sistemas agrícolas tradicionales. Además, fomenta la educación y conciencia sobre la importancia de la agricultura sostenible y el uso responsable de los recursos naturales.

El proyecto propuesto en este artículo ofrece una solución viable para enfrentar los desafíos asociados con el cambio climático y la urbanización. La capacidad de cultivar alimentos en interiores, controlando cuidadosamente las condiciones ambientales, permite una producción constante y confiable sin depender de las estaciones o del clima. Esto puede ser especialmente beneficioso en áreas con condiciones climáticas adversas o limitaciones de espacio.

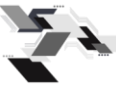
Así mismo, el generar datos históricos puede derivar en análisis de datos a través de diferentes herramientas para implementar un sistema de control automático como lo pueden ser sistemas expertos o sistemas de aprendizaje.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México (TecNM) Campus Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por las facilidades brindadas para la realización del presente trabajo. También a la División de Ingeniería en Sistemas Automotrices y al Subdirección de Posgrado e investigación por el apoyo a la investigación realizada.

VI. REFERENCIAS

- Babiuch, M. (2019). Using the ESP32 microcontroller for data processing. *20th International Carpathian Control Conference*.
- Calderón Vargas, J. C. (2015). *Sistema domótico de riego controlado vía Web utilizando tecnología Arduino*. Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Computacionales.
- Castro Popoca, M. (2008). Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro. *Agricultura técnica en México*, 459-470.
- de Castro, J. (2024). DISPOSITIVO PARA CULTIVO INDOOR DE PLANTAS. *Revista Foco*.
- Guijarro-Rodríguez, A. (2018). Sistema de riego automatizado con Arduino. *Sistema*, 27.
- Menoni, C. A. (2023). Sistema de monitoreo y control de cultivo indoor de cannabis. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, 156-171.
- Murciano Carretero, A. (2019). *Diseño de automatización y control de sistema de cultivo indoor industrial mediante PLC y pantalla HMI*. Universitat Politècnica de València).
- Murciano, A. (2019). *Diseño de automatización y control de sistema de cultivo indoor industrial mediante PLC y pantalla HMI*. Universitat Politècnica de València.



Pravalika, V. (2019). Internet of things based home monitoring and device control using Esp32. *International Journal of Recent Technology and Engineering* 8, 58-62.

Quispe Tapara, H. (2018.). *Diseño de un sistema de riego automatizado por aspersión para viveros de café utilizando la tecnología arduino en la empresa Viveros Ortiz-Pasco.*

Varona Anta, C. (2022). *Cultivo de microgreen de rúcula en agricultura vertical indoor: evaluación económica y medioambiental.* Universidad Politécnica de Cartagena.

VII. AUTORES

Eduardo Machado Díaz

 <https://orcid.org/0000-0003-2610-7570>

Alfredo Orlando Hassan Barrón Quintero

 <https://orcid.org/0009-0007-5299-558X>

Heber Joctan Martínez Sandoval

 <https://orcid.org/0009-0000-0534-2593>