

## AUTOMATIZACION DE UN INVERNADERO PARA PROCESOS HIDROPÓNICOS

### AUTOMATION OF A GREENHOUSE FOR HYDROPONIC PROCESSES

Ing. Ronald Felipe Marca Roque <sup>1 \* §</sup>

Recibido: Abril 15, 2023; Aceptado: Septiembre 2, 2023

#### RESUMEN

El proyecto de automatización de un invernadero para procesos hidropónicos tiene como objetivo implementar tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia y productividad del cultivo hidropónico en un entorno controlado.

El sistema automatizado utiliza sensores ambientales para monitorear variables como temperatura, humedad. Este sistema incluye un sistema de riego preciso y programado que asegura un suministro adecuado de agua y nutriente a las plantas, evitando el estrés hídrico y permitiendo un control preciso de los niveles de pH. Además, se implementa un sistema de gestión y control centralizado que permite monitorear y controlar todos los aspectos del invernadero, desde el riego hasta la ventilación y la climatización.

El invernadero automatizado ofrece numerosos beneficios, como una mayor eficiencia en el uso de recursos, un menor consumo de agua y nutrientes, una reducción de los costos de mano de obra y una producción de cultivos más consistente. Además, el monitoreo constante de datos que proporciona información valiosa para el análisis y la toma de decisiones, permitiendo ajustes precisos y mejoras continuas en el sistema.

**Palabras claves:** Automatización, Hidroponía, Invernadero.

#### ABSTRACT

The greenhouse automation project for hydroponic processes aims to implement advanced technologies to improve the efficiency and productivity of hydroponic cultivation in a controlled environment.

The automated system uses environmental sensors to monitor variables such as temperature, humidity. This system includes a precise and programmed irrigation system that ensures an adequate supply of water and nutrients to the plants, avoiding water stress and allowing precise control of pH levels. In addition, a centralized management and control system is implemented that allows monitoring and controlling all aspects of the greenhouse, from irrigation to ventilation and air conditioning.

The automated greenhouse offers numerous benefits, such as greater efficiency in resource use, reduced water and nutrient consumption, reduced labor costs, and more consistent crop production. Additionally, constant data monitoring provides valuable information for analysis and decision making, allowing precise adjustments and continuous improvements to the system.

**Keywords:** Automation, Greenhouse, Hydroponic.

**Citación:** Marca Roque Ronald Felipe, **AUTOMATIZACIÓN DE UN INVERNADERO PARA PROCESOS HIDROPÓNICOS**. Revista Científica EMINENTE 2023, 7-2: 79-87.

- <sup>1</sup> Ingeniero Mecatrónico – Carrera de Ingeniería Mecatrónica - Unidad Académica La Paz - Escuela Militar de Ingeniería.
- \* Corresponde al Autor (correo electrónico: rnlmarca@gmail.com).
- <sup>s</sup> Dirección de contacto Investigador primer autor: Zona Unificada II C/La Paz N145 – Telf.: (+591) 69863635 - La Paz – Bolivia.

## INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo el hombre ha evolucionado y con él, la producción de alimentos para sacar el mayor provecho y tener un cuerpo sano y fuerte, de esta forma siempre se fue viendo la mejor manera de sembrar cultivos de la mejor calidad posible, con esa meta en mente se logró avances en la parte de producción de cultivos.

Los cultivos bajo invernaderos han permitido con el pasar de los años tener productos de buena calidad, alargando el ciclo del cultivo, permitiendo producir en lugares de difíciles condiciones, obteniendo no solo calidad, también cantidad.

Los cultivos sin suelo (hidroponía o aeroponía) son métodos de producción agrícola, que llegan a suplir lo que la tierra generaba para poder producir cultivos, para así aislarlos en un ambiente más controlado y de manera que se le puede brindar mejor control de nutrientes a la cosecha, como un ejemplo histórico de este avance tenemos a “Los jardines colgantes de Babilonia” que recibían riegos de canales de agua. Este desarrollo en la capacidad de producción de alimentos trajo consigo una nueva implementación al avance tecnológico, pudiendo controlar la capacidad de producción de cultivos de manera eficiente.

Este trabajo propone la automatización de un invernadero para procesos hidropónicos, el sistema mecatrónico permitirá dar al cultivo mejores condiciones para su producción, a través de una técnica hidropónica.

### OBJETIVO GENERAL

Desarrollar la automatización de un invernadero utilizando la técnica hidropónica NFT, para dotar de mejores condiciones ambientales para la producción de lechuga.

## METODOLOGÍA

A lo largo de la ejecución de este estudio, se empleó una metodología basada en la resolución de problemas, la cual se estructuró en siete fases discernibles que se detallan a continuación de manera más técnica:

### Identificación del Problema

En esta fase inicial, se procedió a definir y delimitar con precisión el problema de investigación, con un enfoque claro en la automatización del invernadero hidropónico y la lógica difusa como estrategia de control.

### Análisis y Recopilación de Datos

Se procedió a recolectar datos relevantes y llevar a cabo un análisis exhaustivo de la información disponible relacionada con la automatización de invernaderos, incluyendo tecnologías, métodos y prácticas previas.

### Diseño del Sistema

En esta etapa, se diseñó detalladamente el sistema de automatización, definiendo la arquitectura del invernadero, la selección de sensores, el microcontrolador, así como el desarrollo del sistema de lógica difusa.

### Implementación

Se llevó a cabo la implementación física del sistema diseñado en el invernadero, incluyendo la instalación de sensores, actuadores y el microcontrolador, así como la programación del sistema de lógica difusa.

### Pruebas y Validación

Se procedió a realizar pruebas exhaustivas para validar el funcionamiento del sistema automatizado, evaluando su capacidad para mantener las condiciones ambientales dentro de los parámetros deseados.

### Conclusiones y Recomendaciones

Finalmente, se derivaron conclusiones fundamentadas en los resultados obtenidos y se formularon recomendaciones específicas para futuras investigaciones y aplicaciones de la tecnología de automatización en la agricultura.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### A. Sistema mecánico del Invernadero

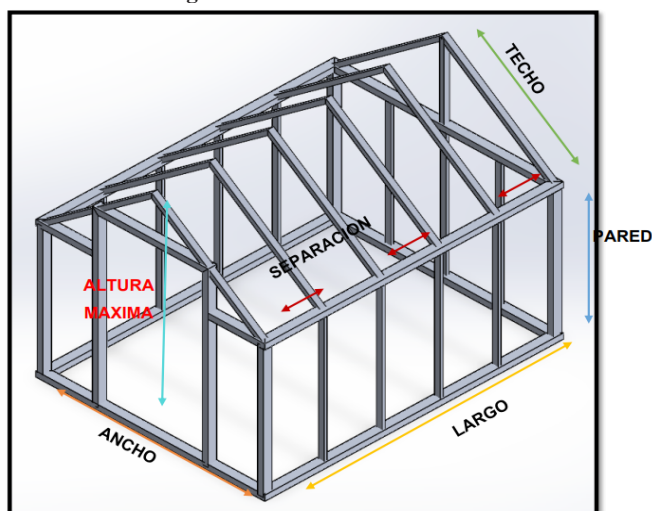
Se construyó un invernadero de tipo capilla simple con especificaciones dimensionales precisas que son

fundamentales para la disposición y funcionalidad de la estructura. Las características dimensionales de este invernadero se detallan de la siguiente manera:

- Ancho: 2 metros
- Largo: 2,5 metros
- Altura de la pared: 1,2 metros
- Altura del techo: 1,2 metros
- Altura máxima en el centro: 1,95 metros
- Separación: 0,5 metros

Estas dimensiones son esenciales para determinar la estructura y la disposición del invernadero, lo que afectará la cantidad de luz solar, la circulación de aire y otros aspectos que influyen en el ambiente interno y, por lo tanto, en el cultivo de las plantas dentro del invernadero.

Figura 1. Diseño del invernadero.



Fuente: Elaboración propia

Después de llevar a cabo un análisis mediante el método de elementos finitos en la estructura del invernadero, se ha decidido proceder con la construcción utilizando perfiles de aluminio de forma rectangular. Estos perfiles han demostrado ser capaces de resistir cargas de nieve o granizo de hasta 4000 Newtons, con un factor de seguridad de 3.

Este enfoque garantiza la robustez y la capacidad de la estructura para soportar condiciones climáticas adversas, como la acumulación de nieve o impactos de granizo, con un margen de seguridad significativo. El uso de perfiles de aluminio rectangulares proporciona

la resistencia estructural necesaria sin comprometer la estabilidad del invernadero.

Figura 2. Construcción del invernadero.



Fuente: Elaboración propia

## B. Sistema mecánico del caballete hidropónico

Para el diseño mecánico del caballete hidropónico, se comenzó tomando en consideración las estructuras de caballetes hidropónicos existentes como punto de referencia. Este enfoque permitió aprovechar las mejores prácticas y lecciones aprendidas de diseños previos para implementar con éxito la técnica de hidroponía en el cultivo.

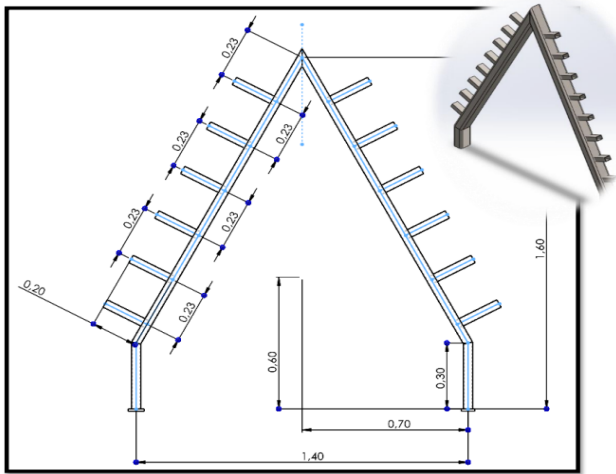
Según las características de cada tipo de caballete, se escogió el caballete hidropónico de tipo piramidal, ya que esta permite un mejor cultivo de la lechuga, ya que este ocupa menos espacio y tienen una mayor capacidad de producción.

Para el caballete del sistema hidropónico que es de tipo piramidal, se tomó en cuenta una altura de 1,70 metros para que al cosechar sea más cómodo para el agricultor, un ancho de la base de 1,40 metros para tener un buen sostén en la base del caballete.

Los soportes de la estructura del caballete hidropónico alojan los tubos PVC para el cultivo de las lechugas. Cada cara principal de la estructura mecánica aloja 6 tubos PVC, donde cada tubo PVC tiene la capacidad de

poder cultivar 10 unidades de lechuga, como se observa en la figura 4.

Figura 3. Diseño CAD del caballete hidropónico.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Caballete hidropónico.



Fuente: Elaboración propia

### C. Sistema electrónico

Para el desarrollo del sistema electrónico del invernadero para procesos hidropónicos se establecen dos subsistemas principales, los cuales son:

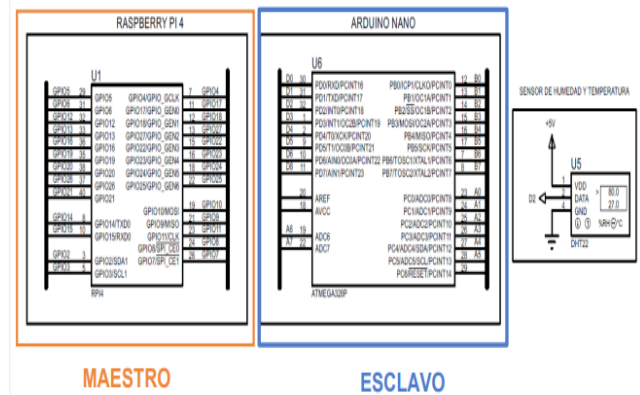
- Sistema de temperatura y humedad.
- Sistema de control de pH.

Para el sistema de temperatura y humedad se consideraron los datos recopilados, donde se determinaron los valores a los que deben encontrarse la temperatura y la humedad

del invernadero para una producción de lechuga en un sistema hidropónico

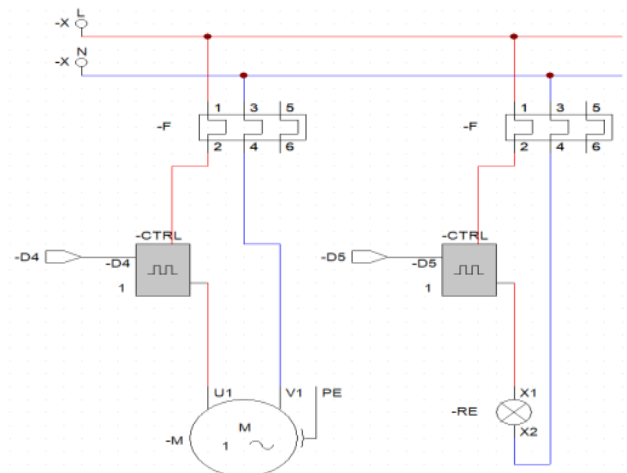
El sistema electrónico para el sistema de temperatura y humedad cuenta con sensores y actuadores que permiten la adecuada climatización dentro el invernadero.

Figura 5. Esquema electrónico del sistema de temperatura y humedad



MAESTRO

ESCLAVO



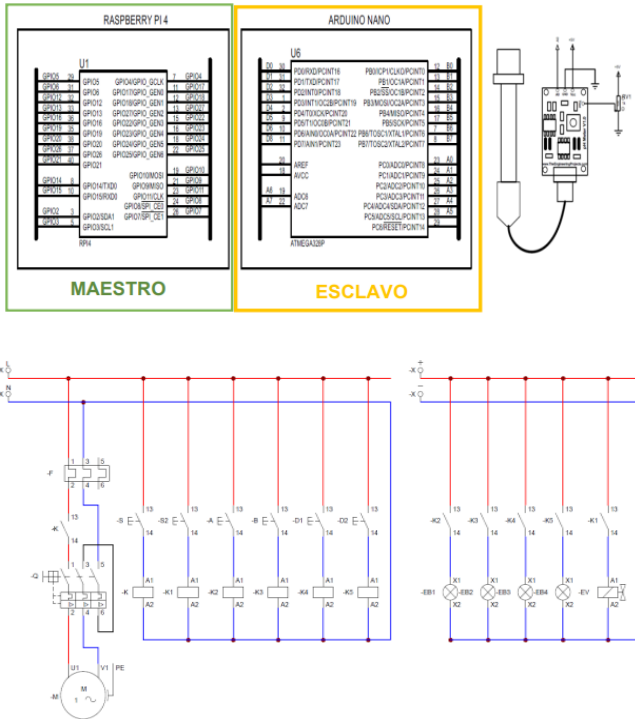
Fuente: Elaboración propia

Para el sistema de control de pH se considera la información recopilada, la cual indica que el rango estable de pH para la producción de lechuga hidropónica se debe encontrar en un rango de 5,5 a 6,0. Para ello el sistema cuenta con un sensor de pH y electrobombas que permiten el paso de la solución nutritiva y los nutrientes necesarios a dosificar al tanque contenedor.

Este diseño técnico garantiza que el pH del medio en el que se cultivan las lechugas se mantenga dentro de los límites ideales para un crecimiento saludable y óptimo. El sensor de pH proporciona mediciones en

tiempo real y, en respuesta a las variaciones detectadas, las electrobombas ajustan de manera automática la inyección de nutrientes, lo que permite mantener un entorno hidropónico estable y propicio para el cultivo de lechugas.

Figura 6. Esquema electrónico del sistema de pH

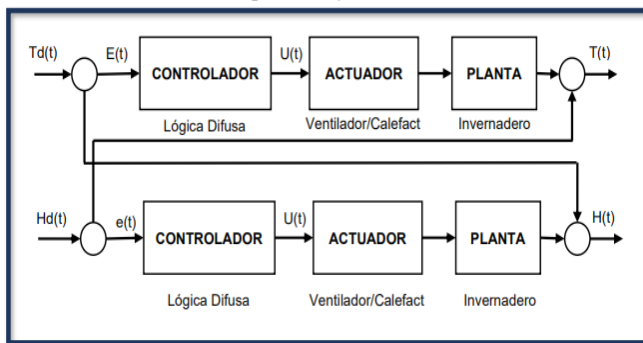


Fuente: Elaboración propia

#### D. Sistema de control

Para el sistema de control de temperatura y humedad se desarrolló un controlador, donde se tiene dos variables de entrada y dos variables de salida (sistema MIMO), el cual se observa en la siguiente figura.

Figura 7. Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura y humedad



Fuente: Elaboración propia

Para ello se crearon las funciones de membresía del control difuso para los sensores de temperatura y humedad; y los actuadores del ventilador y el calefactor, como también las reglas de control difuso, los cuales se muestran en la siguiente figura:

Figura 8. Reglas de control difuso

```

regla1 = ctrl.Rule(temperatura['Fria']&humedad['Poca_Humedad'],ventilador['Vent_Lento'],calefactor['Cal_Bajo'])
regla2 = ctrl.Rule(temperatura['Fria']&humedad['Humedad_Normal'],ventilador['Vent_Lento'],calefactor['Cal_Medio'])
regla3 = ctrl.Rule(temperatura['Fria']&humedad['Mucha_Humedad'],ventilador['Vent_Lento'],calefactor['Cal_Alto'])

regla4 = ctrl.Rule(temperatura['Fresca']&humedad['Poca_Humedad'],ventilador['Vent_Medio'],calefactor['Cal_Medio'])
regla5 = ctrl.Rule(temperatura['Fresca']&humedad['Humedad_Normal'],ventilador['Vent_Lento'],calefactor['Cal_Bajo'])
regla6 = ctrl.Rule(temperatura['Fresca']&humedad['Mucha_Humedad'],calefactor['Cal_Alto'])

regla7 = ctrl.Rule(temperatura['Ambiente']&humedad['Poca_Humedad'],calefactor['Cal_Medio'])
regla8 = ctrl.Rule(temperatura['Ambiente']&humedad['Humedad_Normal'],calefactor['Cal_Alto'])
regla9 = ctrl.Rule(temperatura['Ambiente']&humedad['Mucha_Humedad'],calefactor['Cal_Alto'])

regla10 = ctrl.Rule(temperatura['Calurosa']&humedad['Poca_Humedad'],ventilador['Vent_Medio'],calefactor['Cal_Bajo'])
regla11 = ctrl.Rule(temperatura['Calurosa']&humedad['Humedad_Normal'],ventilador['Vent_Medio'],calefactor['Cal_Bajo'])
regla12 = ctrl.Rule(temperatura['Calurosa']&humedad['Mucha_Humedad'],ventilador['Vent_Medio'])

regla13 = ctrl.Rule(temperatura['Alta']&humedad['Poca_Humedad'],ventilador['Vent_Rapido'],calefactor['Cal_Bajo'])
regla14 = ctrl.Rule(temperatura['Alta']&humedad['Humedad_Normal'],ventilador['Vent_Rapido'],calefactor['Cal_Bajo'])
regla15 = ctrl.Rule(temperatura['Alta']&humedad['Mucha_Humedad'],ventilador['Vent_Rapido'],calefactor['Cal_Bajo'])
    
```

Fuente: Elaboración propia

Donde la secuencia de funcionamiento de control es:

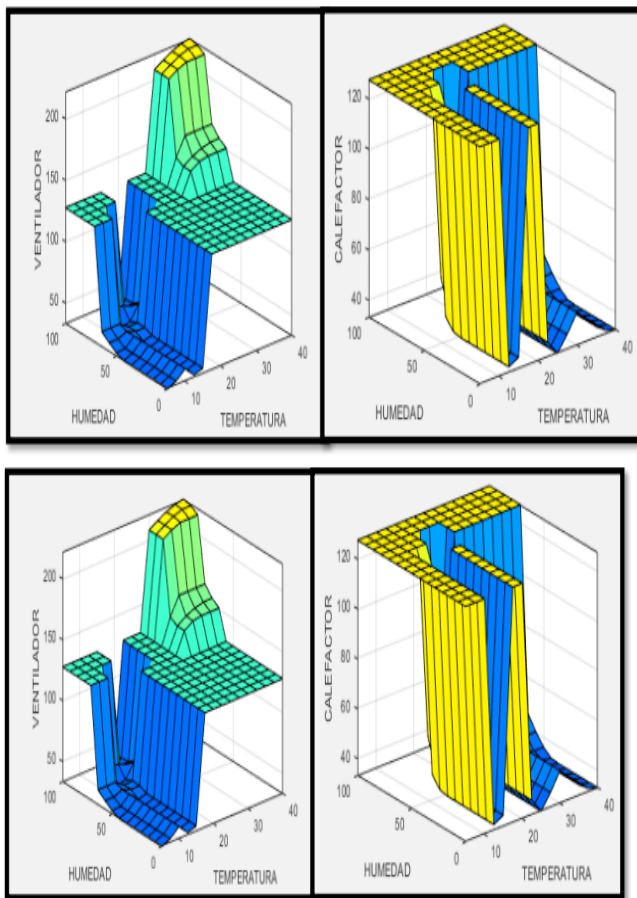
- 1) Adquisición de datos: Se utilizan los sensores DHT11 implementados para medir la temperatura y la humedad en el invernadero, y estos datos son enviados al controlador difuso.
- 2) Fuzzificación: El controlador difuso convierte las mediciones de temperatura y humedad en valores lingüísticos que pueden ser interpretados fácilmente. Por ejemplo, la temperatura de 20 grados podría ser clasificada como “fría”, “fresca”, “ambiente”, “calurosa” o “alta”, mientras que la humedad de 60% podría ser clasificada como “poca humedad”, “humedad normal” o “mucha humedad”.
- 3) Reglas: El controlador difuso utiliza un conjunto de reglas lingüísticas que han sido programadas previamente para determinar la acción de control necesaria. Por ejemplo, una regla podría ser “Si la temperatura es alta y la humedad es baja, entonces aumentar la ventilación”.
- 4) Inferencia: El controlador difuso combina las reglas lingüísticas con los valores lingüísticos obtenidos en el paso de fuzzificación para determinar la acción de control necesaria
- 5) Defuzzificación: El controlador difuso produce una salida difusa que representa la acción de control

necesaria para los actuadores, y se utiliza un método de defuzzificación para convertir esta salida difusa en una acción de control concreta. Por ejemplo, si la salida difusa es “incrementar la ventilación”, se puede setear la potencia de ventilación para alcanzar el equilibrio deseado de temperatura y humedad.

- 6) Ejecución: Finalmente, se ejecuta la acción de control determinada por el controlador difuso. Por ejemplo, si la acción de control es “incrementar la ventilación”, se establece la ventilación en la potencia calculada.

Y una representación gráfica de la respuesta del control difuso es:

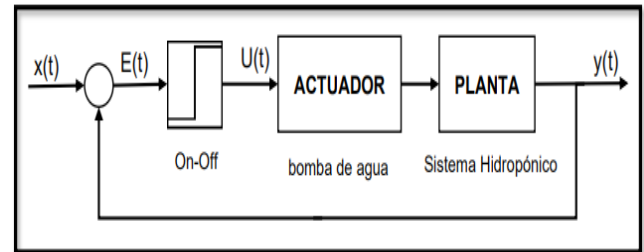
Figura 9. Respuesta del sistema de control difuso



Fuente: Elaboración propia

Y para el sistema de control de pH se tiene un control On - Off, el diagrama de bloques de este se muestra en la siguiente figura:

Figura 10. Respuesta del sistema de control difuso



Fuente: Elaboración propia

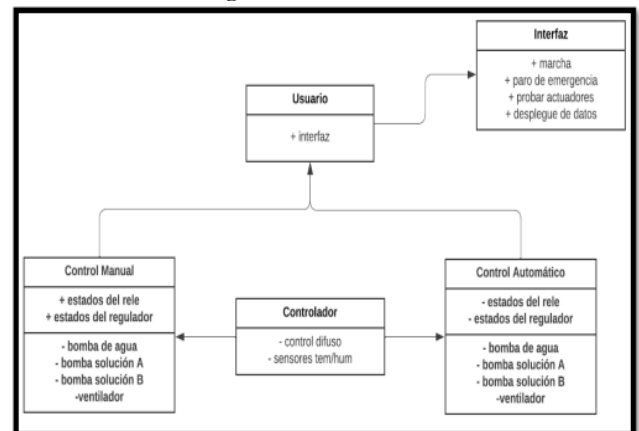
El control ON/OFF del sistema hidropónico para la dosificación de nutrientes funciona de la siguiente manera:

- 1) Se establece un valor deseado para el pH en el sistema hidropónico.
- 2) El sensor de pH se utiliza para medir continuamente el pH en el sistema hidropónico.
- 3) Si el pH medido está por debajo del valor deseado, se activa las bombas peristálticas para agregar una cantidad específica de nutrientes al sistema.
- 4) El proceso se repite continuamente, ajustando el pH del sistema en pequeños incrementos hasta que se alcanza el valor deseado.

### E. Interfaz humano máquina

Para el interfaz humano máquina, se tienen distintos métodos y atributos con los que cuenta el sistema, para ello se tiene el siguiente diagrama UML.

Figura 11. UML estático



Fuente: Elaboración propia

Donde el usuario tiene acceso únicamente al control manual y a los botones de accionamiento, como al botón de marcha para el funcionamiento automático y el paro de emergencia.

Esta interfaz ha sido creada de manera intuitiva y accesible, priorizando la facilidad de uso para el usuario. Proporcionando un control sencillo y directo sobre las funciones del sistema, permitiendo al usuario interactuar con los botones de activación de manera efectiva.

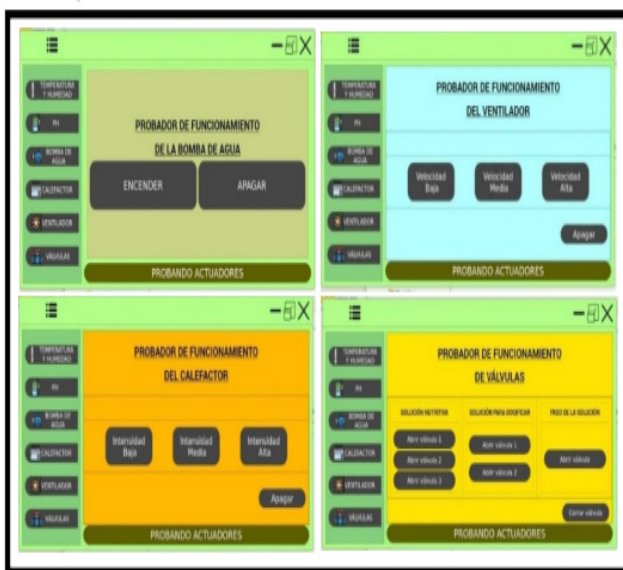
Figura 12. Botones de accionamiento de control automático



Fuente: Elaboración propia

Y para el control manual se tiene las siguientes ventanas con botones de accionamiento para cada actuador del sistema:

Figura 13. Botones de accionamiento de control manual



Fuente: Elaboración propia

En ambos modos de funcionamiento se cuenta con la monitorización de los sensores de temperatura, humedad y pH.

Figura 14. Monitoreo de temperatura y humedad



Fuente: Elaboración propia

### CONCLUSIONES

Se llevó a cabo una investigación integral enfocada en la optimización de la producción de lechugas mediante la técnica hidropónica NFT. Este estudio se ha basado en la colaboración de expertos, la recopilación de datos precisa y el análisis detallado de factores críticos como temperatura, humedad y pH. Los resultados de esta investigación proporcionaron una sólida base para mejorar el proceso de cultivo de lechuga en condiciones hidropónicas.

Además, se ha diseñado una estructura mecánica que puede producir hasta 100 unidades de lechugas por etapa de producción, logrando un aumento significativo del 42.3% en la eficiencia espacial en comparación con los métodos tradicionales de cultivo en un área de 6 metros cuadrados, y para garantizar un control óptimo de las condiciones ambientales y el suministro de nutrientes, se ha desarrollado un sistema de control difuso. Este sistema automatizado regula la temperatura, la humedad y para la dosificación de nutrientes un control ON-OFF.

Finalmente, se ha creado una interfaz humano-máquina amigable en Python que permite a los usuarios supervisar y controlar el sistema de forma manual y automática. Esto proporciona una mayor comodidad y control sobre el proceso de cultivo en el invernadero.



En conjunto, estos avances representan un enfoque integral para mejorar la eficiencia, la productividad y la automatización en la producción de lechugas hidropónicas, lo que tiene un gran potencial para la agricultura moderna y sostenible.

### RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar iluminación artificial, ya que la iluminación artificial es esencial para mantener el crecimiento constante de las plantas en condiciones de baja luz o en climas fríos. Las luces pueden ser controladas mediante un temporizador o mediante sensores de luz para asegurar un uso eficiente de la energía.

También continuar el proyecto con la implementación de IoT obteniendo las variables de pH, humedad y temperatura en tiempo real, implementando sensores de nivel y electroválvulas para el llenado del tanque de forma automática.

### CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declara que no tiene conflictos de interés con la presente investigación.

### AGRADECIMIENTOS

El agradecimiento a la Dirección Nacional de Investigación Ciencia y Tecnología de la Escuela Militar de Ingeniería y al Laboratorio de Ingeniería Mecatrónica de la Unidad de Investigación Ciencia y Tecnología de la Unidad Académica La Paz de la Escuela Militar de Ingeniería por apoyar esta investigación y a la Carrera de Ingeniería Mecatrónica.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AZCON, B., & TALÓN. (2008). Fundamentos de Fisiología Vegetal. España: McGraw-Hill.
- [2] BELTRANO, J., & GIMENEZ, D. (2015). Cultivo en Hidroponía. Buenos Aires - Argentina: Editorial de la Universidad de La Plata.
- [3] BRUNETE, A., SAN SEGUNDO, P., & HERRERO, R. (28 DE JULIO DE 2020). Introducción a la Automatización Industrial.

Obtenido de bookdown.org: [https://bookdown.org/alberto\\_brunete/intro\\_automatica](https://bookdown.org/alberto_brunete/intro_automatica).

- [4] BUDYNAS, R. G., & NISBETT, J. K. (2012). DISEÑO en Ingeniería Mecánica. México: Mc Graw Hill.
- [5] CANOVAS, F., & DIAZ, J. (1993). Cultivos sin Suelo Curso Superior de Especialización. Almería: Editorial del Instituto de Estudios Almerienses.
- [6] COLOMBINI, C., FORGAN, E., & MARTIN, E. (2005). Invernadero Automatizado. Argentina: Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de la Nación.
- [7] GILSANZ, J. C. (2007). Hidroponía. Montevideo - Uruguay: Editado por la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología.
- [8] HORTICULTIVOS. (26 DE JULIO DE 2017). Horticultivos. Obtenido de Horticultivos: <https://www.horticultivos.com/agricultura-protegida/invernaderos/principalestipos-invernaderos/>
- [9] INCAP. (2006). Hidroponía: Sistema de Cultivo NFT. Obtenido de Instituto de nutrición de Centro América y Panamá: [https://www.sica.int/busqueda/busqueda\\_archivo.aspx?Archivo=medu\\_94764\\_2\\_02062015.pdf](https://www.sica.int/busqueda/busqueda_archivo.aspx?Archivo=medu_94764_2_02062015.pdf)
- [10] IEEE. (s.f.). Controladores Industriales Inteligentes. Obtenido de Institute of Electrical and Electronics Engineers: [http://www.ieec.uned.es/investigacion/dipseil/pac/archivos/informacion\\_de\\_referencia\\_ise6\\_1\\_1.pdf](http://www.ieec.uned.es/investigacion/dipseil/pac/archivos/informacion_de_referencia_ise6_1_1.pdf)



**Ronald Felipe Marca Roque.**

Nació en Patacamaya – La Paz – Bolivia, Ingeniero Mecatrónico de la Escuela Militar de Ingeniería, investigador junior en la Dirección Nacional de Investigación, Ciencia y Tecnología DNICYT-EMI.