



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN DE BIBLIOTECAS

CARTA DE AUTORIZACIÓN



| CÓDIGO | AP-BIB-FO-06 | VERSIÓN | 1 | VIGENCIA | 2014 | PÁGINA | 1 de 2 |
|--------|--------------|---------|---|----------|------|--------|--------|
|--------|--------------|---------|---|----------|------|--------|--------|

Neiva, 31 de enero de 2024

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad Neiva

El (Los) suscrito(s):

Dayana Alejandra Gomez Anacona _____, con C.C. No.1007431079 _____,
_____, con C.C. No. _____,
_____, con C.C. No. _____,
_____, con C.C. No. _____,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o _____

titulado DISPOSITIVO CONTROLADOR DE TEMPERATURA COMO MÉTODO PARA LA ERRADICACIÓN DE CULTIVOS DE COCA

presentado y aprobado en el año 2024 como requisito para optar al título de Ingeniero Electrónico ;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN DE BIBLIOTECAS

CARTA DE AUTORIZACIÓN



CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Dayana Alejandra Gomez Anacona

Firma: Dayana A. Gomez

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 4

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: DISPOSITIVO CONTROLADOR DE TEMPERATURA COMO MÉTODO PARA LA ERRADICACIÓN DE CULTIVOS DE COCA

AUTOR O AUTORES:

| Primero y Segundo Apellido | Primero y Segundo Nombre |
|----------------------------|--------------------------|
| Gomez Anacona | Dayana Alejandra |

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

| Primero y Segundo Apellido | Primero y Segundo Nombre |
|----------------------------|--------------------------|
| Robayo Betancourt | Faiber |

ASESOR (ES):

| Primero y Segundo Apellido | Primero y Segundo Nombre |
|----------------------------|--------------------------|
| | |

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero electrónico

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Electrónica

CIUDAD: Neiva AÑO DE PRESENTACIÓN: 2023 NÚMERO DE PÁGINAS: 71

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías Grabaciones en discos Ilustraciones en general Grabados
Láminas Litografías Mapas Música impresa Planos Retratos Sin ilustraciones Tablas
o Cuadros

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 4

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

| <u>Español</u> | <u>Inglés</u> | <u>Español</u> | <u>Inglés</u> |
|--------------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|
| 1. Calentamiento por inducción | Induction heating | 6. Método alternativo | Alternative method |
| 2. Control de temperatura | Temperature control | 7. | |
| 3. Erradicación de la coca | Coca eradication | 8. | |
| 4. Tecnología sostenible | Sustainable technology | 9. | |
| 5. Monitoreo en tiempo real | Real-time monitoring | 10. | |

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

3 de 4

Se ha desarrollado un sistema innovador de calentamiento de agua por inducción con control de temperatura, diseñado específicamente para impactar las plantas de coca mediante el riego a temperaturas superiores a 60°C. Este sistema utiliza una topología ZVS (Zero Voltage Switching) con una bobina de inducción y un tubo de acero galvanizado como elemento calefactor. La llave de paso controla el flujo de agua hacia las plantas, y la fuente de alimentación opera a 12V y 30A. Para garantizar el rango de temperatura, se incorpora un controlador PID con un actuador y un sistema de monitoreo en Matlab.

Este enfoque proporciona un método eficiente y sostenible en la erradicación de la coca al suministrar agua a temperaturas entre 60°C y 70°C, dañando la estructura vegetal de las plantas. La tecnología de calentamiento por inducción permite un funcionamiento adaptado a las necesidades de cada planta. El proyecto aborda el diseño y construcción del sistema, los principios de calentamiento por inducción, el control de temperatura con PID y la interfaz de monitoreo en tiempo real.

Tras someter el sistema a pruebas experimentales, se presenta una evaluación detallada de su eficiencia en el daño a las plantas de coca, demostrando la efectividad del control del sistema. Este proyecto tiene impacto en la agricultura, ingeniería electrónica, erradicación de cultivos ilícitos, investigación científica, medio ambiente, innovación tecnológica y reducción del impacto ambiental. Representa una contribución significativa en diversos campos, promoviendo un enfoque más sostenible y eficiente en la erradicación de la coca.



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

4 de 4



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

An innovative temperature-controlled induction water heating system has been developed, specifically designed to impact coca plants by irrigating at temperatures above 60°C. This system uses a ZVS (Zero Voltage Switching) topology with an induction coil and a galvanized steel tube as a heating element. The stopcock controls the flow of water to the plants, and the power supply operates at 12V and 30A. To guarantee the temperature range, a PID controller with an actuator and a monitoring system is incorporated in Matlab.

This approach provides an efficient and sustainable method in coca eradication by supplying water at temperatures between 60°C and 70°C, damaging the vegetal structure of the plants. Induction heating technology allows operation adapted to the needs of each plant. The project addresses system design and construction, induction heating principles, PID temperature control, and real-time monitoring interface.

After subjecting the system to experimental tests, a detailed evaluation of its efficiency in damaging coca plants is presented, demonstrating the effectiveness of the system control. This project has an impact on agriculture, electronic engineering, eradication of illicit crops, scientific research, environment, technological innovation and reduction of environmental impact. It represents a significant contribution in various fields, promoting a more sustainable and efficient approach to coca eradication.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: Yamil Armando Mosquera Rojas

Firma

Nombre Jurado: Diego Fernando Sendoya Losada

Firma:

DISPOSITIVO CONTROLADOR DE TEMPERATURA COMO MÉTODO PARA LA
ERRADICACIÓN DE CULTIVOS DE COCA

DAYANA ALEJANDRA GOMEZ ANACONA

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA -HUILA
2023

DISPOSITIVO CONTROLADOR DE TEMPERATURA COMO MÉTODO PARA LA
ERRADICACIÓN DE CULTIVOS DE COCA

MODALIDAD: PROYECTO DE GRADO

DAYANA ALEJANDRA GOMEZ ANACONA Cod. 20182172596

Trabajo de grado para aplicar
al título de ingeniero electrónico

Director:
Mag. Faiber Robayo Betancourt

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA, COLOMBIA
2023

Notas de aceptación

Firma del director de Tesis

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Neiva, 10 de noviembre de 2023

DEDICATORIA

Esta tesis se la quiero dedicar a mi amada abuela María Lilia Bermeo, que ahora reside en el cielo y cuyo sueño más profundo era presenciar el momento de mi graduación. A lo largo de mi camino académico, siempre ha estado en mi mente y corazón, sus palabras, su confianza y amor incondicional han sido mi mayor fuente de inspiración. Aunque no pueda estar aquí en persona para celebrar conmigo, siento su presencia en cada logro y en cada desafío superado. Esta tesis es un tributo a ella, una expresión de gratitud por su amor y apoyo. Sé que, desde el cielo, está sonriendo con orgullo mientras cierro este capítulo y comienzo uno nuevo. Gracias por ser mi luz en la oscuridad, mi guía y mi motivación. Te extraño y te amo profundamente.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi profundo agradecimiento a Dios, cuya guía y fortaleza me han acompañado a lo largo de este viaje académico.

A mi querida madre, cuyo amor, sacrificio y apoyo incondicional han sido fundamentales en mi vida, a mi padrastro, por su constante ánimo y comprensión. Agradezco a mi familia su apoyo a lo largo de los años. Me han dado la confianza para seguir y han sido un motor importante para alcanzar esta meta.

Mi más sincero reconocimiento y gratitud se dirigen a todos los docentes del programa de ingeniería electrónica por su contribución a mi crecimiento como profesional en especial al ingeniero Faiber Robayo, mi director de tesis, por su orientación experta, paciencia y dedicación incansable en el proceso de investigación. Sus consejos y sabiduría académica han sido fundamentales en la culminación de este proyecto.

A mis amigos Daniel Libardo Monrroy y Alejandro Palacios, les agradezco por su participación durante todo el proceso, su apoyo constante y por estar a mi lado en cada etapa de este desafío académico.

En particular, quiero destacar la inestimable colaboración de Daniel Libardo Monrroy quien desempeñó un papel integral en cada etapa de este trabajo de investigación. Su conocimiento, apoyo y dedicación fueron esenciales para llevar a cabo este proyecto con éxito, es importante mencionar que, a pesar de la importancia de la contribución su nombre no aparece en la portada de esta tesis debido a que finalmente pudo optar por una modalidad de grado por promedio académico. Sin embargo, quiero que quede claro que su participación y compromiso en este proyecto son igualmente valorados y reconocidos, y esta tesis lleva su huella en cada página.

Por último, quiero expresar mi agradecimiento a mi novio José Manuel Cerquera por su amor y apoyo, ha sido fuente de inspiración y motivación y a todos mis amigos, quienes han sido un motivo de alegría y apoyo a lo largo de mi vida estudiantil. Sus risas, compañía y amistad han enriquecido esta experiencia de aprendizaje.

A todos y cada uno de ustedes, gracias por ser parte de este viaje y por contribuir a mi éxito académico. Su apoyo ha sido fundamental en la realización de este logro.

TABLA DE CONTENIDO

| | Pag |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 17 |
| 2. OBJETIVOS | 18 |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL..... | 18 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 18 |
| 3. FUNDAMENTOS BÁSICOS | 19 |
| 3.1 CULTIVOS DE COCA EN COLOMBIA Y LA ERRADICACIÓN FORZOSA | 19 |
| 3.2 CAUSANTES DE ESTRÉS EN PLANTAS | 20 |
| 3.3 ESTRÉS TÉRMICO..... | 21 |
| 3.4 MÉTODOS DE CALENTAMIENTO | 22 |
| 3.5 METALES FERROMAGNÉTICOS..... | 24 |
| 4. PRUEBAS EXPERIMENTALES | 28 |
| 4.1 HOJAS | 28 |
| 4.2 COGOLLOS..... | 29 |
| 4.3 TALLOS | 30 |
| 4.4 TALLOS Y RAÍZ | 31 |
| 4.5 ASPERSIÓN GENERAL..... | 33 |
| 5. DISEÑO CALENTADOR INDUCTIVO | 35 |
| 5.1 PRIMER DISEÑO..... | 35 |
| 5.1.1 Fuente de alimentación ATX 450 W | 35 |
| 5.1.2 Módulo ZVS | 36 |
| 5.1.3 Arduino..... | 36 |
| 5.1.4 Tubos de acero | 37 |
| 5.1.5 Bobina o inductor..... | 38 |
| 5.1.6 Bomba | 39 |
| 5.1.7 MAX6675 con termopar tipo K | 40 |
| 5.1.8 Sensor ACS712..... | 41 |
| 5.1.9 Descripción de circuito general..... | 42 |
| 5.2 SEGUNDO DISEÑO..... | 43 |
| 5.2.1 Descripción..... | 43 |
| 5.2.2 Fuente..... | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 5.2.3 Bobina con calibre 8. | 44 |
| 5.2.4 Sensor de temperatura DS18B20 | 45 |
| 5.2.5 Tanque..... | 46 |
| 5.2.6 Llave de paso y manguera..... | 46 |
| 6. CONTROL DE TEMPERATURA..... | 48 |
| 7. RESULTADOS..... | 59 |
| 7.1 Resultados de la fase experimental sobre las plantas..... | 59 |
| 7.2 Funcionamiento del control PID..... | 65 |
| 8. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO | 67 |
| 8.1 Tiempo de trabajo del sistema. | 67 |
| 8.2 Comportamiento del Calentador por Inducción con circulación de agua..... | 68 |
| 8.3 Costos | 70 |
| 8.4 Potencia en el sistema | 70 |
| 9. CONCLUSIONES..... | 72 |
| 10. DISCUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS | 73 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pag |
|---|-----|
| Figura 1. Cultivos de coca vs esfuerzos para su control. | 20 |
| Figura 2. Controlador de modo manual. | 26 |
| Figura 3. Tipos de respuesta de un Sistema. | 26 |
| Figura 4. Grafica con variables L y τ. | 27 |
| Figura 5. Exposición de los cogollos a 80 °C por 10 segundos. | 29 |
| Figura 6. Resultado de las pruebas realizadas en tallos. | 31 |
| Figura 7. Exposición de plantas a 70 °C con 500 mililitros de agua. | 31 |
| Figura 8. Diseño general del primer prototipo del circuito. | 35 |
| Figura 9. Características de la fuente de voltaje ATX-450W. | 35 |
| Figura 10. Circuito interno ZVS 1000W. | 36 |
| Figura 11. Arduino uno. | 37 |
| Figura 12. Tubos de acero. | 38 |
| Figura 13. Bobina con alambre de cobre. | 38 |
| Figura 14. Mini bomba sumergible. | 39 |
| Figura 15. Circuito para el control de velocidad de la motobomba. | 40 |
| Figura 16. MAX6675 con termopar tipo k. | 40 |
| Figura 17. Sensor de corriente ACS712. | 41 |
| Figura 18. Implementación del primer diseño en práctica. | 42 |
| Figura 19. Planta con el control implementado. | 43 |
| Figura 20. Fuente de poder S-360-12. | 43 |
| Figura 21. Medida valor bobina con capacitor 22 nF. | 44 |
| Figura 22. Medida valor bobina con capacitor de 10 nF. | 45 |
| Figura 23. Sensor de temperatura DS18B20. | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 24. Tanques fabricados de hierro y acero al carbón. | 46 |
| Figura 25. Llave de paso de $\frac{1}{4}$ " | 46 |
| Figura 26. Llave de paso de $\frac{1}{4}$ " con manguera térmica. | 47 |
| Figura 27. Respuesta de la planta y control con relé prueba 1. | 48 |
| Figura 28. Punto de máxima temperatura prueba 1. | 49 |
| Figura 29. Respuesta de la planta y control con relé prueba 2. | 49 |
| Figura 30. Punto de máxima temperatura prueba 2. | 50 |
| Figura 31. Gráfica de entrada y salida en System Identification. | 50 |
| Figura 32. Resultado de la estimación de la función de transferencia. | 51 |
| Figura 33. Modelo para función de transferencia escogido. | 51 |
| Figura 34. Respuesta del calentador en 7 minutos. | 52 |
| Figura 35. Respuesta sigmoidal con step. | 52 |
| Figura 36. Diagrama de flujo del código implementado en el Arduino. | 54 |
| Figura 37. Control PI con setpoint en 70 °C. | 55 |
| Figura 38. Punto máximo de temperatura con setpoint en 70 °C. | 55 |
| Figura 39. Control PI con setpoint en 69 °C. | 56 |
| Figura 40. Punto máximo de temperatura con setpoint en 69 °C. | 56 |
| Figura 41. Control PI con setpoint en 69.5 °C. | 57 |
| Figura 42. Punto máximo de temperatura con setpoint en 69.5 °C. | 57 |
| Figura 43. Gráfica con las respuestas de la planta a la circulación de agua. | 69 |
| Figura 44. Corriente medida con el sensor ACS 712 con el calentador en funcionamiento. | 71 |

LISTA DE TABLAS

| | Pag |
|---|-----|
| Tabla 1. Comparativo del consumo en un hogar por 6 días. | 23 |
| Tabla 2. Comparación costos en procesos de calentamiento. | 23 |
| Tabla 3. Características de los materiales magnéticos. | 24 |
| Tabla 4. Valores de Kp, Ti y Td para el PID en lazo abierto. | 27 |
| Tabla 5. Pruebas en hojas con 60 °C. | 29 |
| Tabla 6. Pruebas realizadas en tallos. | 30 |
| Tabla 7. Segunda prueba de tallos y raíces. | 32 |
| Tabla 8. Pruebas de aspersión general parte 1. | 33 |
| Tabla 9. Pruebas de aspersión general parte 2. | 34 |
| Tabla 10. Características técnicas del Arduino uno. | 37 |
| Tabla 11. Siglas de los estados de las plantas a lo largo de las pruebas. | 59 |
| Tabla 12. Resultados de las pruebas realizadas en hojas en el árbol 1. | 60 |
| Tabla 13. Resultados de las pruebas realizadas en hojas en el árbol 2. | 61 |
| Tabla 14. Resultados de las pruebas realizadas en hojas en el árbol 3. | 62 |
| Tabla 15. Resultados de las pruebas realizadas en cogollos. | 63 |
| Tabla 16. Resultados de las pruebas realizadas en tallos. | 63 |
| Tabla 17. Resultados de primera prueba con aplicación tallo-raíz vs días. | 64 |
| Tabla 18. Resultados pruebas tallo raíz. | 64 |
| Tabla 19. Resultados de aplicación tallo-raíz vs días. | 65 |
| Tabla 20. Pruebas con temperatura inicial de 30 °C. | 65 |
| Tabla 21. Pruebas con temperatura inicial de 36 °C | 66 |
| Tabla 22. Pruebas con temperatura inicial de 32 °C. | 66 |
| Tabla 23. Tiempo empleado con una temperatura inicial de 30°C. | 67 |

| | |
|---|----|
| Tabla 24. Tiempo empleado con una temperatura inicial de 36 °C. | 67 |
| Tabla 25. Tiempo empleado con una temperatura inicial de 32 °C. | 67 |
| Tabla 26. Costos de los materiales usados en el proyecto. | 70 |
| Tabla 27. Prueba en hojas con 70 °C. | 78 |
| Tabla 28. Prueba en hojas con 75 °C. | 79 |
| Tabla 29. Prueba en hojas con 80 °C. | 80 |
| Tabla 30. Prueba en hojas con 85 °C. | 81 |
| Tabla 31. Prueba en hojas con 90 °C. | 82 |
| Tabla 32. Prueba en hojas con 40 °C. | 83 |
| Tabla 33. Prueba en hojas con 50 °C. | 84 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pag |
|---|-----|
| Anexo A. Pruebas realizadas en hojas con temperaturas desde 70 a 90 °C. | 78 |
| Anexo B. Pruebas realizadas en hojas con temperaturas de 40 y 50 °C. | 83 |
| Anexo C. Código base del controlador PID. | 85 |
| Anexo D. Código de interfaz y lectura puerto serial. | 85 |

LISTA DE ECUACIONES

| | Pag |
|--|-----|
| Ecuación 1. Frecuencia de oscilación. | 25 |
| Ecuación 2. Función de transferencia del PID | 25 |
| Ecuación 3. voltaje salida ACS712. | 42 |
| Ecuación 4. Cálculo de frecuencia. | 44 |
| Ecuación 5. Cálculo de inductancia. | 44 |
| Ecuación 6. Sobreimpulso. | 49 |
| Ecuación 7. Función de transferencia. | 52 |
| Ecuación 8. Cálculo del valor Kp. | 53 |
| Ecuación 9. Cálculo del valor Ki. | 53 |
| Ecuación 10. Cálculo del valor Kd. | 53 |

GLOSARIO

ZVS (Zero-Voltage-Switching): Es un oscilador auto resonante; un circuito de gran simplicidad capaz de generar una considerable potencia de oscilación con una mínima pérdida. Su uso habitual radica en la generación de ondas sinusoidales requeridas para alimentar transformadores de alta frecuencia o diversas aplicaciones similares¹.

System Identification: Es un toolbox de Matlab que se usa para dar una estimación interactiva de modelos tanto lineales como no lineales de un sistema. Importar datos de dominio temporal y de frecuencia, realizar un preprocesamiento de estos, identificar los modelos correspondientes, comparar sus características, y finalmente, validar dichos modelos mediante conjuntos de datos de prueba².

Punto de marchitez: El punto de marchitez se considera uno de los indicadores críticos que reflejan el estado de los cultivos. Dependiendo de cuánto se exceda este límite, las plantas pueden tener la posibilidad de recuperarse o, en caso de superarse el punto de marchitez permanente, los daños resultantes son irreversibles y pueden llevar a la muerte de la planta³.

Inducción: La inducción magnética es el proceso mediante el cual los campos magnéticos dan lugar a la generación de campos eléctricos. Cuando un campo eléctrico se crea en un material conductor, las partículas portadoras de carga experimentan una fuerza que resulta en la inducción de una corriente eléctrica en el conductor⁴.

Ciclo fisiológico: El ciclo fisiológico de una planta abarca desde la germinación de una semilla hasta su crecimiento vegetativo, la floración, la polinización, la formación de frutos y semillas, este ciclo puede variar según la especie y las condiciones ambientales, y algunas plantas pueden tener ciclos anuales, bienales o perennes, lo que significa que pueden completar su ciclo en un año, dos años o persistir durante varios años, respectivamente⁵.

Sobreimpulso: Es la diferencia entre el valor máximo de la respuesta transitoria y el valor final de la respuesta una vez que el sistema se estabiliza después de una perturbación. Se utiliza para evaluar la rapidez y estabilidad del sistema⁶.

¹ Civilpedia. (s.f.). ZVS Driver. Civilpedia. Recuperado de <https://civilpedia.org/p/?t=ZVS-Driver&pid=107>

² MathWorks. (s.f.). MATLAB System Identification Toolbox. MathWorks. Recuperado de <https://la.mathworks.com/products/sysid.html>

³ EOS. (s.f.). Punto de Marchitez Permanente (PMP): ¿Qué es y por qué es importante para la agricultura? EOS. Recuperado de <https://eos.com/es/blog/punto-de-marchitez-permanente/>

⁴ Universidad Politécnica de Madrid. (s.f.). Inducción Electromagnética. Departamento de Física Aplicada. Recuperado de <https://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/magnet/induccion.html>

⁵ Tomi.digital. (s.f.). Ciclo de Vida de las Plantas. Recuperado de <https://tomi.digital/es/56110/ciclo-de-vida-de-las-plantas>

⁶ Universidad Nacional de Tucumán. (2016). Análisis de Respuestas Transitorias: Sistemas de 2do Orden (Documento en línea). Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Recuperado de

RESUMEN

Se presenta el diseño y desarrollo de un innovador sistema de calentamiento de agua por inducción con control de temperatura, diseñado específicamente para impactar las plantas de coca mediante el riego a temperaturas superiores a 60°C. El sistema se basa en una topología ZVS (Zero Voltage Switching) con una bobina de inducción y haciendo uso de un tubo de acero galvanizado como elemento calefactor, el control del flujo de agua hacia las plantas se logra mediante una llave de paso, y la fuente de alimentación del sistema opera a 12V y 30A. Para garantizar el rango de temperatura se incorpora un controlador PID con un actuador. Además, se complementa con un sistema de monitoreo que permite visualizar el comportamiento de la planta, implementado en la plataforma de programación Matlab.

Esta investigación proporciona un método eficiente y sostenible como método alternativo en la erradicación de la coca, al asegurar que el agua se suministre a una temperatura específica, oscilando entre 60°C y 70°C, dependiendo de la aplicación, ya sea dirigida a las hojas o las raíces de la planta. El objetivo es causar daño considerable en la estructura vegetal de la planta, lo que afecta su desarrollo. La tecnología de calentamiento por inducción y el control de temperatura permite un funcionamiento óptimo adaptado a las necesidades de cada planta.

Se abordan múltiples aspectos esenciales, incluyendo el diseño y construcción del sistema, los principios de funcionamiento del calentamiento por inducción, la implementación del control de temperatura mediante el controlador PID y la interfaz de monitoreo en tiempo real desarrollada en Matlab. El sistema se sometió a rigurosas pruebas experimentales para evaluar su eficiencia en el daño causado a las plantas de coca, y se presentan resultados detallados de estas pruebas, así como de la efectividad del control del sistema.

Este proyecto representa una contribución significativa en varios campos, incluyendo la agricultura, ingeniería electrónica, la erradicación de cultivos ilícitos, la investigación científica, el medio ambiente, la innovación tecnológica y la reducción del impacto ambiental.

ABSTRACT

The design and development of an innovative induction water heating system with temperature control is presented, specifically designed to impact coca plants through irrigation at temperatures above 60°C. The system is based on a ZVS (Zero Voltage Switching) topology with an induction coil and using a galvanized steel tube as a heating element, the control of the water flow to the plants is achieved through a stopcock, and the System power supply operates at 12V and 30A. To guarantee the temperature range, a PID controller with an actuator is incorporated. In addition, it is complemented with a monitoring system that allows the plant's behavior to be visualized, implemented in the Matlab programming platform.

This research provides an efficient and sustainable method as an alternative method in coca eradication, by ensuring that water is supplied at a specific temperature, ranging between 60°C and 70°C, depending on the application, whether directed at leaves or roots of the plant. The objective is to cause considerable damage to the vegetal structure of the plant, which affects its development. Induction heating technology and temperature control allow optimal operation adapted to the needs of each plant.

Multiple essential aspects are addressed, including the design and construction of the system, the operating principles of induction heating, the implementation of temperature control using the PID controller, and the real-time monitoring interface developed in Matlab. The system was subjected to rigorous experimental tests to evaluate its efficiency in damaging coca plants, and detailed results of these tests, as well as the effectiveness of the system's control, are presented.

This project represents a significant contribution in several fields, including agriculture, electronic engineering, the eradication of illicit crops, scientific research, the environment, technological innovation and the reduction of environmental impact.

1. INTRODUCCIÓN

La coca, planta base para la producción de cocaína, ha desempeñado un papel significativo en la economía y la política colombiana, así como en la lucha contra el narcotráfico a nivel global. En este contexto, se han implementado diversos métodos de erradicación con el objetivo de reducir la producción de cocaína y sus efectos negativos en la sociedad colombiana y en el mundo. Colombia ha sido uno de los principales productores de cocaína en el mundo, en gran parte debido a la extensa presencia de cultivos de coca en su territorio, lo que ha generado una serie de desafíos tanto para la seguridad nacional como para el bienestar social de la población⁷.

Para combatir esta problemática, Colombia ha empleado diversos métodos de erradicación de cultivos los cuales varían desde la erradicación manual hasta el uso de productos químicos y maquinaria especializada. Cada uno de estos enfoques ha tenido sus propias implicaciones ambientales, económicas y sociales, lo que ha generado debates y controversias en el país⁸.

El enfoque es desarrollar un dispositivo experimental que utilice agua como principio y sea respetuoso con el medio ambiente, reduzca la necesidad de personal humano, optimice recursos y reduzca costos. La metodología es experimental, con pruebas sobre las plantas para determinar el control y el diseño óptimo. Se enfoca en mantener la temperatura del agua para dañar las plantas, sin abordar la energización o el transporte debido a la dificultad de acceso y la escasez de recursos en las zonas de cultivo. Estos aspectos se considerarán en futuros trabajos.

El sistema implementado incluye una fuente de alimentación, un calentador por inducción con un tanque de acero, un controlador proporcional-integral (PI), una llave de paso y una manguera para el riego de las plantas. Los resultados indican que es necesario alcanzar temperaturas específicas para causar daños severos en las hojas, se requiere una temperatura de 60°C; mientras que, para dañar la estructura general de la planta es necesario aplicar calor a un nivel de 70°C. Este proyecto busca proporcionar un control preciso de la temperatura para causar la muerte de las plantas de manera efectiva.

El proyecto presentado en este documento se distingue como una contribución valiosa a la investigación gracias a su carácter innovador y debido a que la documentación existente es limitada. Debido a que el activo es el agua, se demuestra un profundo compromiso con la sostenibilidad ambiental; además, se tiene una serie de beneficios antes mencionados. Estas ventajas se traducen en una propuesta que promete un impacto positivo tanto en la industria agrícola y electrónica como en la economía en general.

⁷ Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC)-Sistema Integrado de Monitoreo de Cultivos Ilícitos (SIMCI), Monitoreo de territorios afectados por cultivos ilícitos 2020 (Bogotá: UNODC-SIMCI, 2021).

⁸ VARGAS M Ricardo, Erradicación Manual Forzosa, Otro revés para el estado y los derechos de las comunidades, Tomado de la web, Ubicación: https://viva.org.co/cajavirtual/svc0781/pdfs/Erradicacion_Manual_Forzosa.pdf. 26 de mayo del 2022.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un dispositivo experimental que permita la erradicación del cultivo de coca aplicando agua caliente mediante el control adecuado de su temperatura.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Encontrar experimentalmente el rango de temperatura adecuado para afectar el cultivo de coca con el menor tiempo y consumo energético posible.
- Crear un dispositivo experimental que permita generar la temperatura para afectar el cultivo de coca.
- Implementar un sistema de control adecuado que permita mantener la temperatura con buena precisión dentro de los rangos óptimos para afectar la planta de coca.
- Evaluar la eficiencia del dispositivo experimental.

3. FUNDAMENTOS BÁSICOS

3.1 CULTIVOS DE COCA EN COLOMBIA Y LA ERRADICACIÓN FORZOSA

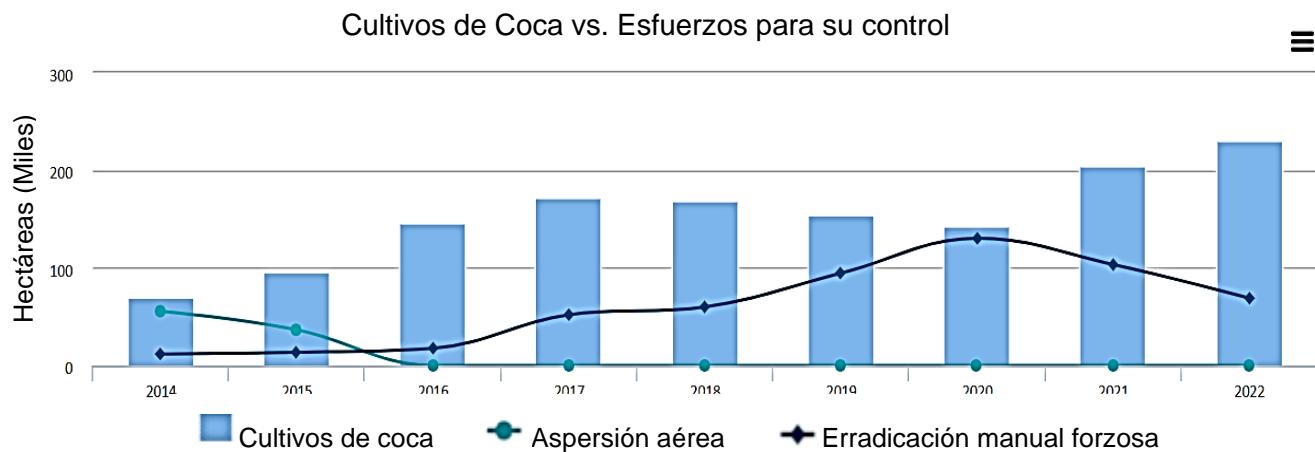
Mediante un informe dado por la UNODC (united nations office on drug and crime) el 20 de octubre de 2022 a través del sistema integrado de monitoreo de cultivos ilícitos (SIMCI) se observa un notable incremento del 43% de hectáreas sembradas referente al año anterior y un máximo histórico en la producción potencial de clorhidrato de cocaína, esto como ellos señalan son una amenaza para el potencial cultural del país y su biodiversidad⁹.

El cultivo de coca genera consecuencias nocivas sociales, pues en muchas de las regiones donde hay presencia de estos cultivos se encuentran también agrupaciones guerrilleras y organizaciones ilegítimas de fuerza que generan intransigencia y riesgos de seguridad pública, además de un grave impacto ambiental. Estos argumentos son también los presentados para justificar las acciones que el gobierno nacional toma en el marco del programa de la política antidrogas.

Las modalidades que se han planteado para llevar a cabo la erradicación manual forzosa en Colombia son básicamente 3. La primera es dar la adjudicación de contratos a empresas privadas que hacen una vinculación civil y llevar a cabo una erradicación manual, con los conocidos como Grupos Móviles de Erradicación (GME). La segunda es mediante el programa de erradicación de cultivos mediante aspersión con uso de glifosato terrestre (PECAT) y es manejado por la policía antinarcóticos. La tercera modalidad consiste en utilizar un gran número de personal que desarrolla acciones de erradicación manual forzada adelantada por personal de las fuerzas armadas. Anteriormente se hacía uso de una modalidad la cual consiste en la aspersión del químico glifosato de manera aérea; sin embargo, dado que dicho método causaba efectos negativos en niveles tanto humanos como ambientales se prohibió su uso, esto a su vez causó que se incrementara el uso de las modalidades de erradicación manual forzosa. Finalmente, estos métodos no resultan ser tan efectivos pues al mismo tiempo incrementaron las hectáreas de cultivo sembradas.

⁹ Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito - UNODC. (2021). El cultivo de coca alcanzó niveles históricos en Colombia con 204,000 hectáreas registradas en 2021. Recuperado de <https://www.unodc.org/colombia/es/el-cultivo-de-coca-alcanzo-niveles-historicos-en-colombia-con-204-000-hectareas-registradas-en-2021.html>

Figura 1. Cultivos de coca vs esfuerzos para su control.



Fuente: Viva.org.co. (s.f.). Imagen de Erradicación Manual Forzosa. En Erradicación Manual Forzosa en Título del documento o sitio web. Recuperado de https://viva.org.co/cajavirtual/svc0781/pdfs/Erradicacion_Manual_Forzosa.pdf

3.2 CAUSANTES DE ESTRÉS EN PLANTAS

Estrés por déficit hídrico. Aunque el agua es un factor importante para el desarrollo de cualquier planta, algunas de estas han desarrollado respuestas que les permite tolerar algunos niveles de déficit de agua, desde un estrés hídrico leve hasta hábitats desérticos. Poder adaptarse a estas condiciones traen consigo modificaciones en el crecimiento, desarrollo del metabolismo, entre otros y estas adaptaciones dependen de las respuestas a nivel morfológico, anatómico, celular y molecular que tenga cada planta¹⁰.

Estrés por inundación. Esto causa un efecto negativo en la mayoría de las plantas terrestres, ya que reduce su crecimiento, causa deficiencia de oxígeno, cambia el metabolismo de la planta, por esto y otras razones, exponer a las plantas a largos períodos de inundaciones puede causar cambios morfológicos causando afectaciones a largo plazo¹¹.

Estrés por cambios de temperatura. La temperatura de las plantas depende de la del ambiente, en procesos como la división celular que se desarrolla entre los 5 y 30°C la influencia de la temperatura es directa, además puede afectar procesos como la fotosíntesis, respiración,

¹⁰ Sánchez-Pérez, L. A., & Flórez-Romero, R. (2009). Acción colectiva y confianza en la reducción del riesgo: una lectura desde las comunidades afectadas por la industria petrolera en Barrancabermeja, Colombia. Revista Colombiana de Sociología, 32(2), 129-150. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652009000200006

¹¹ Hernández-Rojas, D., & Corredor-Bermúdez, G. (2012). Estrategia para la gestión del conocimiento en la cadena de suministro. Ingeniería y Desarrollo, (31), 96-113. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2011-21732012000100010

acumulación de azúcares, absorción de nutrientes, transpiración y en general con todo el metabolismo de la planta¹².

3.3 ESTRÉS TÉRMICO

La elevación de la temperatura por un tiempo prolongado puede causar daños irreversibles en el metabolismo y desarrollo de las plantas. Se reconocen cuatro tipos de estrés térmico en las plantas: el provocado por temperaturas altas sostenidas; los episodios frecuentes de temperaturas altas (“heat shock”); el daño por enfriamiento (de 0 a 10 °C) o “chilling injury” en numerosos frutos, follajes y flores tropicales; y los daños por congelamiento a temperaturas inferiores a los 0 °C, que causan la formación de hielo en los tejidos de las plantas.

La exposición de las plantas a temperaturas mayores a 50°C causa un severo daño a nivel celular en cuestión de minutos. Sin embargo, el régimen de temperatura que pueda soportar una planta puede variar de acuerdo con la sensibilidad de los procesos fisiológicos de la planta¹³.

Las altas temperaturas generan cambios anatómicos, morfológicos y funcionales en la planta, además puede provocar desórdenes fisiológicos como el “achaparramiento”, es decir, enanismo debido al poco desarrollo del follaje y floración temprana, la respuesta varía de acuerdo con la etapa fenológica, el cultivo y los diferentes genotipos, esto también depende si son altas temperaturas nocturnas y diurnas¹⁴.

Teniendo en cuenta las afectaciones que se pueden llevar a cabo en las diferentes plantas mediante el estrés térmico, se plantean diferentes soluciones entorno a ello, entre las cuales se encuentran calentar directamente el tallo de la planta o aplicar alguna sustancia que genere alta temperatura. Sin embargo, se evalúa como una posibilidad que al aplicar temperatura directamente al tallo se podrían generar diferentes inconvenientes como incendios, los cuales generaría un grave impacto ambiental; por lo tanto, se decide aplicar mediante un elemento propio del ecosistema como lo es el agua. Al aplicar el agua caliente directamente a la planta se puede generar este estrés térmico por un lapso de tiempo y al disminuir la temperatura el líquido queda en el ambiente sin causar ningún impacto.

¹² Benavides-Mendoza, A. (2016). Ecofisiología y bioquímica del estrés en plantas [PDF]. Recuperado de ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Adalberto-Benavides-Mendoza/publication/305346608_Ecofisiologia_y_bioquimica_del_estres_en_plantas/links/57893ca808ae59aa6675e204/Ecofisiologia-y-bioquimica-del-estres-en-plantas.pdf

¹³ Hidalgo, C., Castillo, O., & Castillo, D. (2017). Aportes al conocimiento de la fauna de murciélagos (Chiroptera: Mammalia) en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Braulio Carrillo, Costa Rica. Revista Tecnología en Marcha, 30(1), 173-182. Recuperado de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1659-13212017000100020&script=sci_arttext

¹⁴ Carballo, M., & Salazar, F. (2017). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de mieles de abeja (*Apis mellifera*) producidas en Costa Rica. Revista Tecnología en Marcha, 30(1), 183-190. Recuperado de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-13212017000100021

3.4 MÉTODOS DE CALENTAMIENTO

Dado que se decidió utilizar el agua como elemento base para realizar la transferencia de temperatura y generador de estrés térmico en los cultivos, se deben entonces evaluar los diferentes métodos de calentamiento para identificar cuál de ellos es el más adecuado teniendo en cuenta los factores de eficiencia, facilidad e impacto ambiental.

En un documento realizado por el instituto de investigaciones en biodiversidad y medioambiente se realiza una comparación de las energías y los gases de efecto invernadero que se generan utilizando métodos de calentamiento para cocción de alimentos haciendo uso de la electricidad y el gas natural. En este documento se llevan a cabo una serie de diferentes pruebas con las cuales se estudia la energía usada en el calentamiento de agua, para ello se obtuvieron los rendimientos para calentamiento de agua en cocinas convencionales a gas natural y cocinas eléctricas de plato, además de calentadores eléctricos de inmersión, para los cuales los rendimientos de calentamiento fueron entre 29% y 62% con uso de gas natural y las emisiones generadas abarcaron un amplio rango desde el 55% hasta el 80%, mientras que con el uso de energía eléctrica el rendimiento fue del 72% al 96% y las emisiones de gases estuvieron entre el 40% y hasta 94%. Además, se realizaron diversas pruebas con el fin de analizar la eficiencia mediante calentamiento a diferentes intensidades para un calentamiento más rápido. Finalmente concluyen que para el calentamiento en olla el uso de gas natural es más conveniente; sin embargo, si se trata de calentar agua de manera rápida con alta intensidad el recurso eléctrico presenta mejores resultados¹⁵.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por el instituto se decide que debido a que se debe calentar el agua de manera rápida es mejor basar el calentador en métodos eléctricos, para lo cual se debe considerar que existen diferentes tipos de calentadores.

En una investigación realizada por estudiantes de la Universidad EAFIT, se llevó a cabo un estudio sobre este tema. En dicho estudio, se concluyó que el método de calentamiento más eficiente es el calentamiento por inducción (CPI). Este método se destaca por producir un calentamiento directo sobre el objeto de interés y puede generar temperaturas superiores a las de la fuente. Además, se señala que, en comparación con otros métodos de calentamiento eléctrico, los CPI pueden alcanzar una eficiencia de hasta el 90% y generar altas temperaturas en poco tiempo¹⁶.

Una investigación hecha por la Universidad técnica de Cotopaxi del Ecuador realiza la comparación entre varios métodos de calentamiento y da los impactos positivos que trae el calentamiento por inducción. La inducción magnética ofrece la posibilidad de alcanzar altas temperaturas, ausencia de pérdidas en transferencias caloríficas, fácil automatización y control

¹⁵ Universidad Nacional de La Plata. (s.f.). Documento completo [Archivo PDF]. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/100144/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

¹⁶ Valbuena, G. A., Rivera, J. E., & Roa, A. (2013). Diseño de un sistema para la gestión de recursos humanos basado en competencias y desarrollo de un aplicativo web para su implementación. Ingeniería y Competitividad, 15(2), 177-191. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-91652013000200014#:~:text=Uno%20de%20los%20m%C3%A9todos%20de,%2C%20entre%20otras%20%5B1%5D

del ciclo de trabajo, también tienen una buena eficiencia. A nivel ambiental el lugar a calentar puede determinarse con precisión, el calentamiento puede ser regulado con precisión, además de no generar ninguna producción de gases contaminantes, y a nivel económico, una instalación de calentamiento inductivo normalmente implica una inversión grande que debe ser considerada y debe compararse a las técnicas de calefacción alternativas, pero es un sistema que en largos periodos de uso permite disminuir los costos de consumo¹⁷.

Tabla 1. Comparativo del consumo en un hogar por 6 días.

| | Potencia (Watts) | Estimación de horas de uso diario | consumo diario (Kw/h) | Estimación de horas mensuales | Costo de consumo en dólares. | Tiempo hierve 1L de agua | %eficiencia |
|----------------------|------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------|-------------|
| Ducha eléctrica | 1800 | 2h | 3.6 | 50 | 21.6 | 8 min | 40.83% |
| Calefón eléctrico | 8400 | 2h | 16.8 | 50 | 100.8 | 5 min | 14% |
| Calefón a gas | 133000 | 2h | 532 | 50 | 12 | 6 min | 7.36% |
| Termostato | 2000 | 3h | 4 | 50 | 24 | 14 min | 21.30% |
| Calentador magnético | 4750 | 2h | 3 | 50 | 18 | 5 min | 65.33% |

Fuente: Universidad Técnica de Cotopaxi. (s.f.). Imagen de [Comparativa consumo en un hogar]. En Título del documento o sitio web del repositorio. Recuperado de <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/4371>

En la Universidad de Chile expresan que el calentamiento inductivo reúne varias ventajas, se destaca una mayor densidad de potencia (del orden de 30 – 300 [W/cm²]) y menor costo de mantenimiento. Es decir, para un mismo nivel de potencia, el espacio físico requerido por el calentador inductivo será menor que los otros y por tener una configuración más sencilla y limpia, el mantenimiento del equipo se reduce notablemente¹⁸.

Tabla 2. Comparación costos en procesos de calentamiento.

| Tecnología | combustión | resistiva | inductiva |
|----------------------|------------|-----------|-----------|
| Costo de inversión | Alto | Medio | Medio |
| Costo de operación | Bajo | Medio | Medio |
| Mantenimiento | Alto | Medio | Bajo |
| Facilidad de control | Baja | Media | Alta |

Fuente: Universidad de Chile. (s.f.). Imagen de [Comparación costos en procesos de calentamiento]. En Título del documento o sitio web del repositorio. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102050>

Basándose en los datos obtenidos de estas investigaciones, se decide implementar un calentador basado en la inducción electromagnética. Esta elección se debe a que al compararlo con el uso de gas doméstico, los calentadores basados en inducción presentan

¹⁷ Universidad Técnica de Cotopaxi. (s.f.). Título del recurso (o nombre del documento, si está disponible) [Documento en línea]. Repositorio UTC. Recuperado de <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/4371>

¹⁸ Universidad de Chile. (s.f.). Título del recurso (o nombre del documento, si está disponible) [Documento en línea]. Repositorio de la Universidad de Chile. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102050>

emisiones de gases similares; Sin embargo, la eficiencia de los calentadores por inducción es mucho mayor cuando se utiliza energía eléctrica. Entre los diferentes tipos de calentadores eléctricos, el método inductivo se destaca por ser el más eficiente y rápido.

3.5 METALES FERROMAGNÉTICOS

En un documento de la Universidad Politécnica de Madrid señalan que “El fenómeno del magnetismo era conocido ya por los antiguos griegos desde hace más de 2000 años. Se observaba que ciertos minerales (imanes) podían atraer o repeler pequeños objetos de hierro. De hecho, el nombre de magnetismo proviene de la provincia griega Magnesia, donde se encuentran los yacimientos más importantes de la magnetita (Fe_3O_4), mineral con acusadas propiedades magnéticas. Aunque se tenía conocimiento de este fenómeno de forma experimental no fue hasta mediados del siglo XIX cuando se formularon teóricamente todas las interacciones de tipo eléctrico y magnético¹⁹”

Los imanes cuentan con dos polos, el polo norte (N) y el polo sur (S), teniendo una relación entre las cargas de que si son iguales se repelen y si son diferentes se atraen. Para que ocurra esto un cuerpo magnético debe acercarse a otro, sin embargo, esto dependerá del tipo de material y su comportamiento en presencia de un cuerpo magnético.

Tabla 3. Características de los materiales magnéticos.

| Tipo de material | Características | Comportamiento | Ejemplos |
|------------------------|---|--|---------------------------------|
| Ferromagnéticos | Son atraídos por un imán | Reordenamiento y alineación de los momentos magnéticos de los átomos | Hierro, cobalto, níquel, acero. |
| Paramagnéticos | Son atraídos débilmente por un imán | La alineación de los momentos magnéticos es mínima | Platino, Aluminio, Sodio. |
| Diamagnéticos | no son atraídos por un imán natural y pueden ser repelidos por el | alineación de los momentos es nula a la dirección del momento del material magnético | Mercurio, Plata, Cobre, Oro. |

Fuente: UIHM. (s.f.). Imagen de [Características de los materiales magnéticos]. En What is Induction Heating en Título de la página web. Recuperado de <https://www.u ihm.com/es/Induction-Heating-Technology/What-is-Induction-Heating373.html>

Para el calentamiento por inducción se da la combinación entre la Ley de Joule y la de Ley de Foucault que son las conocidas como corrientes remolino o parásitas. Esto pasa cuando una pieza de metal se coloca en el inductor y entra en el campo magnético, la circulación de estas corrientes es inducida dentro, fluyendo contra la resistencia eléctrica del metal, generando calor preciso y localizado sin ningún contacto directo entre la parte y el inductor. Este

¹⁹ Universidad Politécnica de Madrid. (s.f.). Introducción a la magnetohidrodinámica. Recuperado de https://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/magnet/intro_magnet.html

calentamiento se produce con piezas tanto magnéticas como no magnéticas y se refiere a menudo como el "Efecto Joule²⁰".

Círculo resonante o circuito tanque: Es una red LC en paralelo que funciona a una determinada frecuencia denominada frecuencia de resonancia, es capaz de almacenar energía eléctrica y magnética. En ese sentido las bobinas intercambian su energía con los condensadores generando una señal senoidal que con el tiempo se amortigua.

La frecuencia de oscilación viene dada por la Ec. 1.

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$
 Ecuación 1

Donde F es la frecuencia de oscilación, L es el valor de la inductancia medido en Henrios y C es el valor del capacitor medido en Faradios.

Control de procesos: El concepto de Control de Procesos se emplea comúnmente para hacer referencia a sistemas cuyo propósito radica en mantener ciertas variables dentro de rangos de operación deseados. Estos sistemas de control pueden requerir intervención humana de manera continua o bien funcionar de manera completamente automática.

Un sistema en lazo cerrado toma la salida del proceso y la compara con una señal de referencia, lo que permite un monitoreo constante de la variable en todo momento. Por lo tanto, la principal distinción entre un sistema de lazo abierto y uno de lazo cerrado radica en la capacidad de este último para conocer la evolución de la variable que se desea controlar, en contraste con el lazo abierto, que no tiene información continua sobre el comportamiento de la variable²¹.

Control PID: Los controladores PID (Proporcional, Integral y Derivativo) son ampliamente empleados en la industria como sistemas de control. La función de transferencia del PID se define en la Ecuación 2.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{is}} + T_{ds} s \right)$$
 Ecuación 2

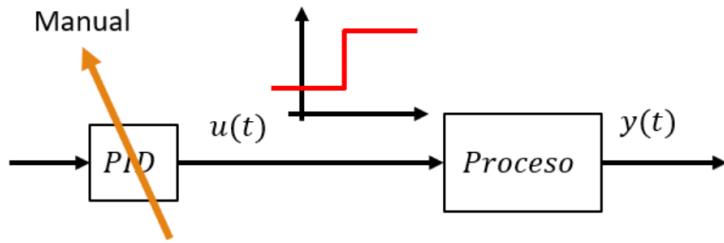
donde Kp es la ganancia proporcional, Ti el tiempo integral y Td el tiempo derivativo.

Ziegler y Nichols en lazo abierto: El controlador se ajusta al modo manual con el fin de inducir una variación en la salida del controlador PID. Para ello, se introduce una señal de entrada del tipo escalón (normalmente un escalón unitario) y a partir de la respuesta en la salida, se derivan los parámetros del controlador PID.

²⁰ UIHM. (s.f.). ¿Qué es el calentamiento por inducción? Recuperado de <https://www.u ihm.com/es/Induction-Heating-Technology/What-is-Induction-Heating373.html>

²¹

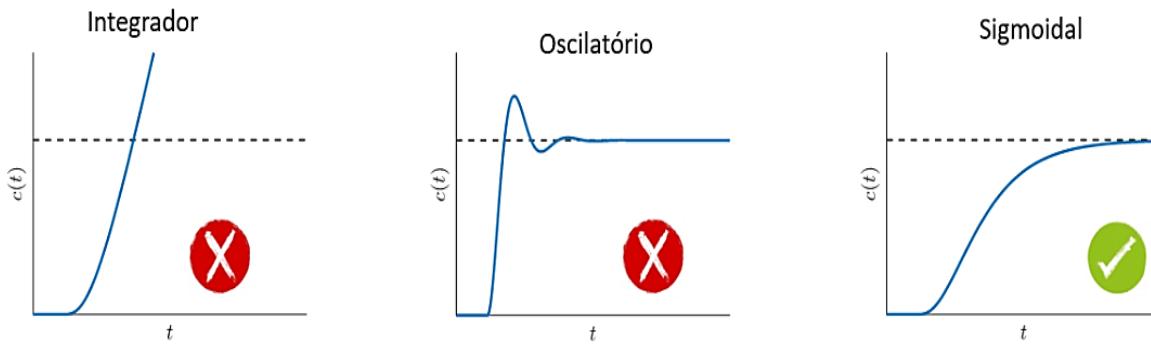
Figura 2. Controlador de modo manual.



Fuente: Control Automático Educación. (s.f.). Imagen en "Ziegler-Nichols: Sintonía de control PID". En Control Automático Educación. Recuperado de <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/ziegler-nichols-sintonia-de-control-pid/>

Para aplicar este método, es fundamental que el sistema exhiba un comportamiento de tipo sigmoidal o tenga una forma en S en su respuesta. Esto implica que el sistema no debe presentar sobreimpulso en la respuesta en lazo abierto, ni mostrar una dinámica integradora que aumente de manera constante con el tiempo²².

Figura 3. Tipos de respuesta de un Sistema.

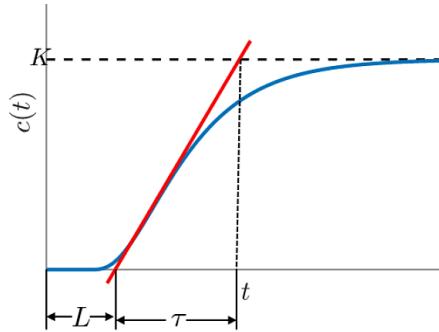


Fuente: Control Automático Educación. (s.f.). Imagen en "Ziegler-Nichols: Sintonía de control PID". En Control Automático Educación. Recuperado de <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/ziegler-nichols-sintonia-de-control-pid/>

La curva S está definida por 2 constantes. Por el retardo en el tiempo L y por la constante de tiempo τ .

²² Control Automático Educación. (s.f.). Ziegler-Nichols: Sintonía de control PID. En Control Automático Educación. Recuperado de <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/ziegler-nichols-sintonia-de-control-pid/>

Figura 4. Grafica con variables L y τ .



Fuente: Control Automático Educación. (s.f.). Imagen en "Ziegler-Nichols: Sintonía de control PID". En Control Automático Educación. Recuperado de <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/ziegler-nichols-sintonia-de-control-pid/>

Ziegler y Nichols sugirieron un ajuste PID estableciendo los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo con la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de K_p , T_i y T_d para el PID en lazo abierto.

| Controlador | K_p | T_i | T_d |
|-------------|-------------------------|-----------------|--------|
| P | $\frac{\tau}{KL}$ | ∞ | 0 |
| PI | $0.9 * \frac{\tau}{KL}$ | $\frac{L}{0.3}$ | 0 |
| PID | $1.2 * \frac{\tau}{KL}$ | $2L$ | $0.5L$ |

Fuente: Control Automático Educación. (s.f.). Imagen en "Ziegler-Nichols: Sintonía de control PID". En Control Automático Educación. Recuperado de <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/ziegler-nichols-sintonia-de-control-pid/>

4. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Con el fin de realizar la adquisición de datos se lleva a cabo una fase experimental en algunas muestras de cultivo para obtener el rango de temperatura en el cual se causa daño o inclusive la muerte en la planta, dado que no se encontraron documentos con esta información para que el diseño del dispositivo sea confiable.

La fase experimental se estructuró por partes, las pruebas se dividieron dependiendo de la parte de la planta a experimentar (hojas, tallo, raíz, cogollo). Además, se tuvo en cuenta la exposición a diferentes temperaturas, con el fin de determinar el daño del agua caliente en cada zona de la planta, y así establecer cómo se provoca una mayor afectación con menor cantidad de líquido y menor temperatura.

4.1 HOJAS

En la primera parte de experimentación se escogieron plantas en el mismo ciclo fisiológico⁵ y como la zona a tratar en este caso son las hojas, se escogieron algunas de ellas para ser sometidas a diferentes temperaturas y tiempos de exposición mediante la técnica de inmersión; con el fin de obtener resultados verídicos se realiza la misma prueba en 3 plantas diferentes evitando que los resultados sean producto de una casualidad.

Se utilizaron tiempos de exposición en intervalos de 5 segundos variando en 5, 10, 15 y 20 segundos, con cada tiempo de muestra se relacionaron temperaturas desde 70 a 90 grados Celsius (°C) con variaciones de 5 grados. Esta fase se llevó a cabo en registro durante 8 días tomando evidencias cada dos días de la evolución de las hojas.

Debido a que se observó una afectación general con cada una de las temperaturas usadas, se decide repetir las pruebas; sin embargo, esta vez utilizando un rango más bajo en las temperaturas, de 40 a 60 °C con variaciones de 10 grados, con tiempos de exposición de 5 y 15 segundos debido a que se determinó que a mayor tiempo de exposición solo se acelera el efecto, pero no es una variable que cambie el nivel de daño.

En las tablas del anexo 1 se muestran las pruebas realizadas desde 70 a 90 °C y en el anexo 2 se muestran las tablas con las pruebas realizadas a 40 y 50 °C, estas se encuentran organizadas por tiempo y temperatura a la cual fueron expuestas; así mismo se encuentran imágenes con la evidencia recién tuvo el contacto y tras el tiempo de evolución para verificación de los cambios.

A continuación, en la Tabla 5 se muestran pruebas a una temperatura de 60 °C debido a que esta fue escogida como la mínima necesaria para causar un daño en las hojas.

Tabla 5. Pruebas en hojas con 60 °C.

| 60°C | Árbol 1 | Árbol 2 | Árbol 3 |
|-------|---------|---------|---------|
| 5seg | | | |
| 15seg | | | |

Fuente: elaboración propia

4.2 COGOLLOS

La segunda parte del experimento se llevó a cabo exponiendo los cogollos de 3 plantas a una temperatura de 80 °C y con un tiempo de exposición de 10 segundos. Esta fase se llevó a cabo con el fin de determinar si al exponer esta parte de la planta se causaba un efecto general o solo afectaba la parte expuesta.

Figura 5. Exposición de los cogollos a 80 °C por 10 segundos.



Fuente: elaboración propia

Como se ve en las figuras, con la prueba realizada en los cogollos solo se observa un cambio en este sin afectar el resto de la planta.

4.3 TALLOS

La tercera parte del experimento buscaba determinar la afectación causada en la planta al exponer el tallo principal a diferentes temperaturas. En este caso con 80 y 90 °C en un tiempo de 5 segundos. Se hizo la aplicación con la planta en posición horizontal, al ser aplicado de esta forma solo se tiene contacto con el tallo sin tocar la raíz para verificar si el daño es exclusivo de esta zona.

Tabla 6. Pruebas realizadas en tallos.

| Tallos | | |
|---------|---|--|
| | 80° | 90° |
| Árbol 1 |  |  |
| Árbol 2 |  |  |
| Árbol 3 |  |  |

Fuente: elaboración propia

Figura 6. Resultado de las pruebas realizadas en tallos.



Fuente: elaboración propia

Al realizar la aplicación solo en el tallo de la planta, no se evidenció ningún cambio ni afectación.

4.4 TALLOS Y RAÍZ

En la cuarta parte del experimento se utilizaron dos plantas con una aplicación en tallo raíz, las cuales se expusieron a 70 °C con 500 mililitros de líquido; así mismo, se muestran imágenes con la evidencia recién tuvo el contacto y tras el tiempo de evolución para verificación de los cambios.

Figura 7. Exposición de plantas a 70 °C con 500 mililitros de agua.



Fuente: elaboración propia

Con el fin de verificar los datos se realiza una nueva aplicación con una temperatura menor, en este caso se tomaron 3 plantas a 60 °C y con una cantidad de 200 mililitros.

Tabla 7. Segunda prueba de tallos y raíces.

| | | |
|---------|---|--|
| Árbol 1 |   | |
| Árbol 2 |   | |
| Árbol 3 |   | |

Fuente: elaboración propia

4.5 ASPERSIÓN GENERAL

Como parte final de los experimentos se expusieron 12 plantas a una aspersión general a temperaturas de 50 y 70 °C con una cantidad de 500 y 750 mililitros para cada temperatura durante un periodo de 20 días de seguimiento.

Tabla 8. Pruebas de aspersión general parte 1.



Fuente: elaboración propia

Tabla 9. Pruebas de aspersión general parte 2.

| Aspersión general | | |
|---|--|--|
|  |  |  |
|  |  |  |
| Resultados | | |
|  |  | |

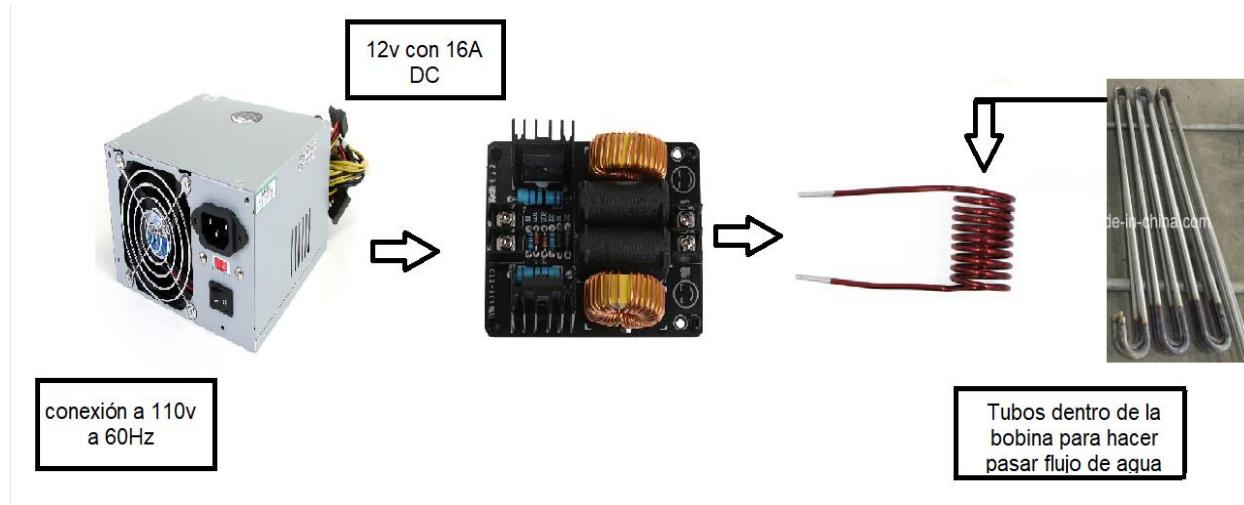
Fuente: elaboración propia

Se anexan como fotos los resultados únicamente de las plantas que presentaron un cambio, en este caso solo las que estaban expuestas a una temperatura de 70 °C.

5. DISEÑO CALENTADOR INDUCTIVO

5.1 PRIMER DISEÑO

Figura 8. Diseño general del primer prototipo del circuito.



Fuente: elaboración propia

5.1.1 Fuente de alimentación ATX 450 W.

Esta es una fuente de alimentación avanzada con un rendimiento acústico y térmico bueno, tiene tecnología inteligente de control térmico del ventilador y es silencioso. La fuente está equipada con dos rieles de +12V que pueden soportar una carga máxima de 16 A para una confiabilidad adicional del sistema²³.

Figura 9. Características de la fuente de voltaje ATX-450W.



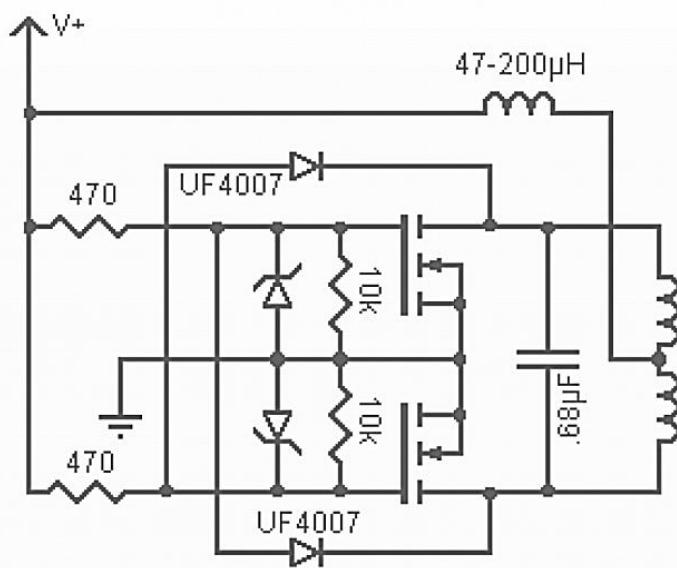
²³ [INSIGNIA. (2017). Guía del usuario, Fuente de alimentación ATX 450W o ATX 550W. Recuperado de: https://files.bbystatic.com/Dazuv3ULU1Rlc3yFsXPpLQ%3D%3D/NS-PCW4508-NS-PCW5508_17-0459_WEB_V1_SP_Final%2B1r.pdf]

Fuente: INSIGNIA. (2017). Imagen de [Características de la fuente de voltaje ATX-450W] Recuperado de: https://files.bbystatic.com/Dazuv3ULU1Rlc3yFsXPpLQ%3D%3D/NS-PCW4508-NS-PCW5508_17-0459_WEB_V1_SP_Final%2B1r.pdf

5.1.2 Módulo ZVS.

El circuito inductor ZVS (Zero Volt Switching Driver) es un oscilador resonante conocido como uno de los controladores más eficientes y potentes para bobinas de inducción, se basa en la técnica de conmutación resonante de voltaje cero con la cual dar la energía a la bobina de inducción. Los MOSFET presentes en el circuito conmutan (encendido y apagado) cuando el voltaje a través de ellos se convierte en cero, es un circuito muy simple que puede oscilar con una alta potencia y poca pérdida²⁴.

Figura 10. Circuito interno ZVS 1000W.



Fuente: Civilpedia. (s.f.). Imagen de [Circuito interno ZVS 1000W]. En ZVS Driver en Civilpedia. Recuperado de <https://civilpedia.org/p/?t=ZVS-Driver&pid=107>

5.1.3 Arduino.

Es una board basada en un microcontrolador Atmega328. Incluye, reguladores de tensión, un puerto USB conectado a un módulo adaptador USB-Serie que permite programar el microcontrolador desde cualquier PC y también hacer pruebas de comunicación con el propio chip. Tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 4 pueden ser utilizados para salidas PWM), 6 entradas análogas, un resonador cerámico de 16 MHz, un conector para USB tipo hembra, un Jack para fuente de Poder, un conector ICSP y un botón reset²⁵.

²⁴ Civilpedia. (s.f.). ZVS Driver. Recuperado de <https://civilpedia.org/p/?t=ZVS-Driver&pid=107>

²⁵ Plus Electric. (2014). Arduino Uno: Especificaciones y Características. Recuperado de: <https://pluselectric.wordpress.com/2014/09/21/arduino-uno-especificaciones-y-caracteristicas/>

Figura 11. Arduino uno.



5.1.3.1 Entradas y salidas. Cada uno de los 14 pines digitales se puede usar como entrada o como salida. Estos funcionan a 5V y cada uno puede suministrar hasta 40 mA. La intensidad máxima de entrada también es de 40 mA. Cada uno de los pines digitales dispone de una resistencia de pull-up interna de entre 20KΩ y 50 KΩ que está desconectada. Arduino también dispone de 6 pines de entrada analógicos que trasladan las señales a un conversor analógico/digital de 10 bits.

RX y TX: Se usan para transmisiones serie de señales TTL.

PWM: Arduino dispone de 6 salidas destinadas a la generación de señales PWM de hasta 8 bits.

5.1.3.2. Características técnicas.

Tabla 10. Características técnicas del Arduino uno.

| | |
|-----------------------------------|---|
| Microcontrolador | Atmega328 |
| Voltaje de operación | 5v |
| Voltaje de entrada (Recomendado) | 7-12v |
| Voltaje de entrada (Límite) | 6.20v |
| Pines para entrada-salida digital | 14(6 pueden usarse como salida de PWM) |
| Pines de entrada analógica | 6 |
| Corriente continua por pin IO | 40mA |
| Corriente continua en el pin 3.3v | 50mA |
| Memoria Flash | 32KB (0.5KB ocupados por el bootloader) |
| SRAM | 2KB |
| EEPROM | 1KB |
| Frecuencia de reloj | 16MHz |

Fuente: Bolaños DJ. (s.f.). imagen de [Características técnicas del Arduino]. Recuperado de <https://www.bolanosdj.com.ar/MOVIL/ARDUINO2/CaracteristicasArduino.pdf>

5.1.4 Tubos de acero.

Los tubos de acero escogidos para este diseño fueron tubos de acero al carbón, la cual puede soportar altas presiones y temperaturas de hasta 530° C, se usó tubo de calibre 5/16 este tiene

un grosor aproximado de 0,035 pulgadas y dadas las características propias del material es adecuado para el calentamiento y paso del líquido²⁶.

Figura 12. Tubos de acero.



Fuente: TubeValco. (s.f.). Imagen de [Tubos de acero]. En Tubing de Acero al Carbon en TubeValco. Recuperado de <https://www.tubevalco.mx/ferreteria-industrial/tubing-de-acero-al-carbon/>

5.1.5 Bobina o inductor:

Los inductores son componentes pasivos de dos terminales que son capaces de generar un flujo magnético cuando una corriente eléctrica circula a través de ellos. Estos dispositivos se fabrican enrollando un hilo conductor alrededor de un núcleo, que puede ser de material ferromagnético o simplemente al aire. La unidad de medida utilizada para expresar su inductancia es el Henrio (H). Estos componentes encuentran aplicaciones en una amplia variedad de campos, siendo particularmente comunes en la industria automotriz y tecnológica. Sin embargo, también se hallan presentes en numerosos dispositivos eléctricos que utilizamos cotidianamente, tales como radios, televisores, transmisores, antenas e incluso en el sistema de arranque de vehículos²⁷.

Figura 13. Bobina con alambre de cobre.



²⁶ PISA-E. (2020). Catálogo de Tubing PISA. Recuperado de: <https://www.pisa-e.com/wp-content/uploads/2020/04/catalogo-de-tubing-pisa-2020.pdf>

²⁷ Cómo Funciona. (s.f.). Una bobina. [En línea]. Disponible en: <https://como-funciona.co/una-bobina/> [22/10/2023].

Fuente: Desconocido. (s.f.). Imagen de [Inductor de varilla de 10 piezas]. En bobina de varilla magnética, inductancia de filtrado de CC. Recuperado de <https://ae01.alicdn.com/kf/Se31e7d75a2d042>

5.1.6 Bomba.

Figura 14. Mini bomba sumergible.



Fuente: elaboración propia

Mini bomba de agua sumergible con un voltaje de funcionamiento de 2,5v a 6v DC, permite tener un flujo de hasta 2 litros de agua por minuto (de 80 -120l/h dependiendo del voltaje de alimentación), sirve para trabajos y proyectos sencillos que requieran de un pequeño caudal.

Incluye un motor interno de 0,3A y la carcasa está fabricada de termoplástico resistente a la erosión provocada por el fluido. Es totalmente sumergible. Su instalación es sencilla, solo se necesita colocar una pequeña manguera en la salida de la bomba, alimentarla con el voltaje deseado y sumergirla completamente en el líquido que deseamos bombear.

5.1.6.1. Características:

- Tensión: 2.5-6V.
- Elevación máxima: 40-110cm / 15.75"-43.4".
- Tasa de flujo: 80-120L / H.
- Diámetro exterior: 7.5mm / 0.3".
- Diámetro interior: 5mm / 0.2".
- Altura: aprox.30mm / 1.2".
- Material: plástico de ingeniería.
- Modo de conducción: Diseño CC, motriz magnética.
- La vida laboral continua durante 500 horas²⁸.

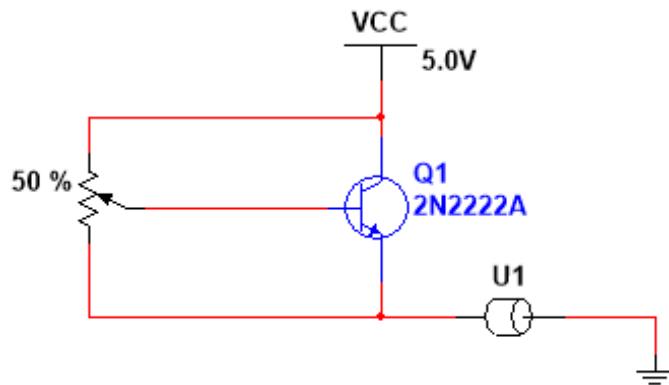
5.1.6.2. Circuito control motobomba.

Para el control de velocidad de la motobomba se usa un circuito simple diseñado para controlar velocidad de motores DC, este cuenta con un potenciómetro de 10kΩ y un transistor PNP

²⁸ AVElectronics. (s.f.). Mini Bomba de Agua Sumergible 120L/h. Recuperado de: <https://avelectronics.cc/producto/mini-bomba-de-agua-sumergible-120l-h/>

2N2222A, con los cuales se regula el paso de voltaje hacia la motobomba y así disminuye o aumenta el caudal que circula por los tubos de acero²⁹.

Figura 15. Circuito para el control de velocidad de la motobomba.

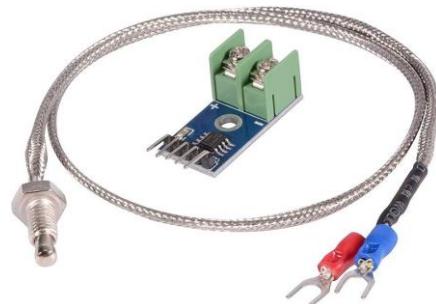


Fuente: elaboración propia

5.1.7 MAX6675 con termopar tipo K.

El MAX6675 es un convertidor analógico a digital que es usado con termopares tipo K. Se puede conectar fácilmente el termopar a cualquier microcontrolador a través de una interfaz SPI unidireccional. Cuenta con la electrónica necesaria para amplificar, compensar y convertir a digital el voltaje generado por el termopar, lo que hace muy sencilla la tarea de conectar un termopar a un microcontrolador³⁰.

Figura 16. MAX6675 con termopar tipo k.



Fuente: Desconocido. (s.f.). Imagen de [MAX6675 con termopar tipo k]. Recuperado de https://m.media-amazon.com/images/I/619cZfXJC2L._AC_UF1000,1000_QL80_.jpg

²⁹ VIAFARA LASSO, Victor. Control velocidad de Motores DC con Transistor y Potenciómetro - DC motor speed control [video]. Youtube. (22 de abril del 2017). 3:38 minutos. [Consultado: 12 de abril de 2023]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=5qGW4BUUb64>

³⁰ CarroD MX. (s.f.). Módulo Sensor MAX6675 de Temperatura Termopar Tipo K. Recuperado de: <https://www.carrod.mx/products/modulo-sensor-max6675-de-temperatura-termopar-tipo-k#:~:text=Descripci%C3%B3n,de%20una%20interfaz%20SPI%20unidireccional>.

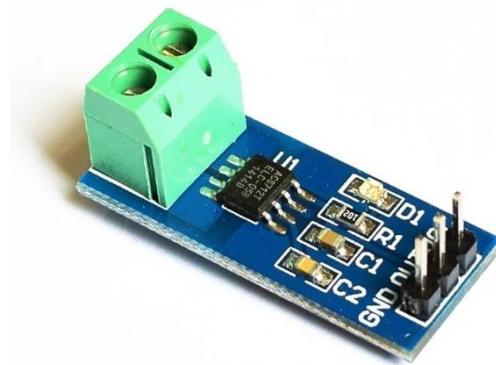
5.1.7.1. Características.

- Voltaje de alimentación mínima: 3.3 V
- Voltaje de alimentación máximo: 5 V
- Corriente de funcionamiento: 50 mA
- Corriente de consumo máximo: 1.5 mA
- Temperatura de medición mínima: 0 °C
- Temperatura de medición máxima: 1024 °C
- Resolución de la temperatura: 0.25 °C
- Modo de salida: SPI señal digital
- Resolución: 12 bits, 0.25 °C
- Frecuencia de reloj SPI máxima Fscl: 4.3 Mhz
- Tiempo de conversión: 0.17 segundos (Máximo 0.22 segundos)
- Temperatura de operación mínima: 20°C
- Temperatura de operación máxima: 85 °C
- Número de pines: 5
- Dimensiones: 38 mm X 16 mm

5.1.8 Sensor ACS712.

El sensor ACS712 es un dispositivo que se utiliza para medir la corriente eléctrica en circuitos. Detecta la intensidad de la corriente y produce una señal de salida proporcional a esta corriente. Es útil en aplicaciones como el monitoreo de consumo eléctrico, medición de corriente en circuitos de carga de baterías y detección de sobrecorriente en circuitos eléctricos. Hay modelos disponibles con diferentes capacidades de corriente para adaptarse a las necesidades específicas³¹.

Figura 17. Sensor de corriente ACS712.



Fuente: Naylamp Mechatronics. (s.f.). *Imagen del Sensor de Corriente ACS712*. [En línea]. Disponible en: https://naylampmechatronics.com/blog/48_tutorial-sensor-de-corriente-acs712.html [Fecha de acceso].

El sensor ACS712 produce una señal de 2.5 voltios cuando no hay corriente (0A), y a partir de ahí, la señal aumenta de manera proporcional a la corriente medida. Esta relación se representa gráficamente como una línea recta en una gráfica de Voltaje vs. Corriente. La

³¹ Naylamp Mechatronics. (s.f.). *Tutorial: Sensor de Corriente ACS712*. [En línea]. Disponible en: https://naylampmechatronics.com/blog/48_tutorial-sensor-de-corriente-acs712.html [6/9/2023].

pendiente de esta línea representa la sensibilidad del sensor, y la intersección en el eje Y es 2.5 voltios. La ecuación de la recta que describe esta relación es descrita en la Ecuación 3.

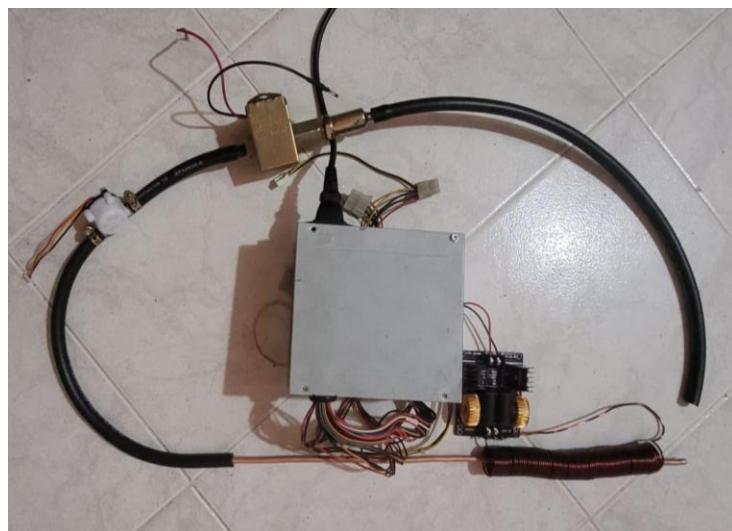
$$\text{Voltaje} = \text{Sensibilidad} \times \text{Corriente} + 2.5 \text{ voltios}$$

Ecuación 3

5.1.9 Descripción de circuito general.

Inicialmente se propuso un diseño en el cual se planteaba tener un flujo constante de agua a la temperatura deseada. Para ello se usaba una fuente comutada de computador de 450W que tenía una salida de 12 v con 16 A; a esta se conectaba un circuito inductor ZVS de 1000W el cual usando la energía entregada por la fuente la dirige hacia una bobina hecha con 100 gramos de cobre calibre 22 según el estándar AWG. Dentro de la bobina se encontraban conectados 3 tubos de acero 5/16 externos de aproximadamente 18 cm interconectados entre sí, además se tenía la conexión de una manguera 5/16 resistente a altas temperaturas. Además, una motobomba que se encargaría de impulsar el agua desde un contenedor hasta los tubos que estarían a alta temperatura por la acción del campo generado en la bobina y al pasar el líquido por estos se deberían calentar a la temperatura deseada.

Figura 18. Implementación del primer diseño en práctica.



Fuente: elaboración propia

El diseño presentó varias fallas, en un inicio se consideró que el largo de los tubos era suficiente para calentar el flujo en movimiento, sin embargo, dado que la bobina solo recibía 3 tubos en su interior apenas se tenía un camino de aproximadamente medio metro el cual no resultó suficiente para lograr la temperatura. Otro aspecto observado es que la bobina que se estaba usando no era de un valor adecuado, ya que el acero se calentaba, pero no lograba mantener la temperatura y dicha bobina exigía demasiada potencia a la fuente resultando en un apagado de la misma al no poder cumplir con tal exigencia.

5.2 SEGUNDO DISEÑO

5.2.1 Descripción.

Para el segundo diseño se planteó el cambio de los tubos de acero y el flujo constante por un diseño tipo tanque de acero galvanizado, en el cual se retiene una cantidad de agua hasta que alcance cierta temperatura. Esta es monitoreada con el sensor DS18B20. Además, se usa un control PI (el diseño de este será presentado en el capítulo 6), para que esta se mantenga en los rangos de temperatura deseados; luego se hace fluir el agua hasta la planta con una llave de paso. También fue necesario ajustar la bobina inductora, pues el calibre usado no era suficiente para obtener un flujo de corriente adecuado y no se lograba calentar lo suficientemente rápido la estructura. Para la alimentación del dispositivo se cambió a una fuente de 12 v con 30 A con el fin de que se lograra aprovechar todo el potencial del ZVS.

Figura 19. Planta con el control implementado.



Fuente: elaboración propia

5.2.2 Fuente.

Se cambió al modelo S-360-12 debido a que el circuito requiere una mayor potencia, esta fuente cuenta con 12 v y 30 A, es decir, 360 W nominales.

Figura 20. Fuente de poder S-360-12.



Fuente: elaboración propia

5.2.3 Bobina con calibre 8.

Se hicieron pruebas de diseño para encontrar el valor del inductor adecuado para la frecuencia de oscilación, mediante las ecuaciones 4 y 5.

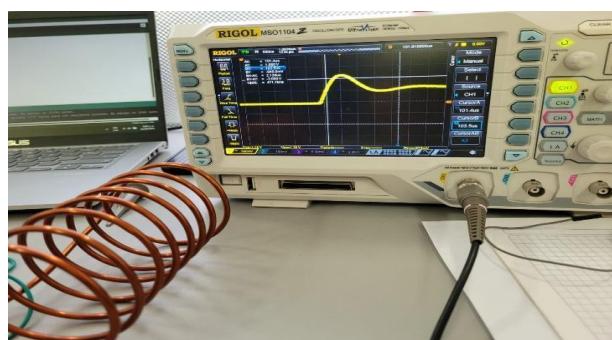
$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{L*C}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 F^2 C} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde F es la frecuencia de oscilación, L es el valor de la inductancia medida en Henrios y C es el valor del capacitor medido en Faradios.

En el primer caso se usó un capacitor de 22 nF, se midió el periodo de esta oscilación y esta correspondió a 2.2 μ s con una frecuencia de 45.4 kHz.

Figura 21. Medida valor bobina con capacitor 22 nF.



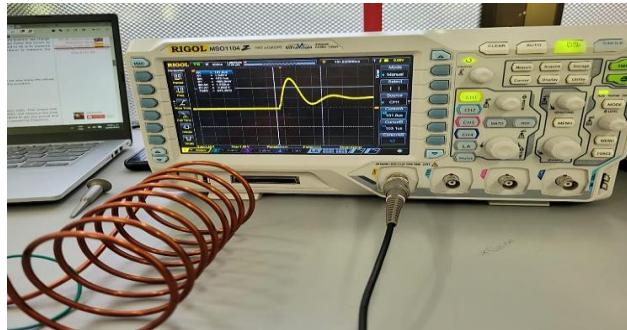
Fuente: elaboración propia

Usando la Ecuación 5, se obtiene el valor de L.

$$L = \frac{1}{4 * \pi^2 * \left(\frac{1}{2.2 \mu s}\right)^2 * 22 nF} = 5.57 \mu H$$

En el segundo caso se usó un capacitor de 10 nF, el periodo en este caso fue de 1.5 μ s con una Frecuencia de 64.5 kHz.

Figura 22. Medida valor bobina con capacitor de 10 nF.



Fuente: elaboración propia

Usando nuevo la Ecuación. 5, se obtiene.

$$L = \frac{1}{4 * \pi^2 * \left(\frac{1}{1.55 \mu s} \right)^2 * 10 nF} = 6 \mu H$$

Ahora se calcula la frecuencia de trabajo del circuito usando el valor de la bobina.

$$F = \frac{1}{2\pi * \sqrt{6\mu H * 0.6\mu F}} = 83.8 \text{ KHz}$$

5.2.4 Sensor de temperatura DS18B20

El cambio del sensor MAX6675³² por el DS18B20 se realizó debido a que el MAX6675 mostraba una inexactitud en sus lecturas de temperatura cuando estaba expuesto al campo magnético. El DS18B20 fue elegido por su mayor robustez ante interferencias magnéticas, lo que garantiza mediciones más precisas y confiables en entornos donde el campo magnético puede afectar la exactitud de las lecturas del sensor.

Figura 23. Sensor de temperatura DS18B20.



Fuente: Naylamp Mechatronics. (2016). Sensor Digital de Temperatura DS18B20. [Imagen]. Recuperado de https://naylampmechatronics.com/blog/46_tutorial-sensor-digital-de-temperatura-ds18b20.html#:~:text=El%20DS18B20%20es%20un%20sensor,sensor%20en%20el%20mismo%20bus

³² Naylamp Mechatronics. (30/07/2016). Tutorial: Sensor Digital de Temperatura DS18B20. Recuperado de https://naylampmechatronics.com/blog/46_tutorial-sensor-digital-de-temperatura-ds18b20.html#:~:text=El%20DS18B20%20es%20un%20sensor,sensor%20en%20el%20mismo%20bus

5.2.5 Tanque.

Figura 24. Tanques fabricados de hierro y acero al carbón.



Fuente: elaboración propia

El primer tubo se hizo de hierro con tubos pequeños en la entrada y salida de acero, con rosca y tapones; sin embargo, después de evidenciar que con este material el calentador no tenía la suficiente potencia, se hizo el mismo diseño, pero esta vez en acero al carbón. Sin embargo, el grosor, tapón y la soldadura de los tubos pequeños seguían pidiendo corrientes altas. Finalmente, como tercer diseño se implementó un tubo de acero de menor grosor; además, las tapas se hicieron con una lámina de aluminio y se pegaron con adhesivo epóxico, de forma que el trabajo del circuito no se fuerce y trabaje de manera adecuada.

5.2.6 Llave de paso y manguera.

La llave de paso, conocida también como válvula de cierre, se describe como un dispositivo que suele estar fabricado en metal, alguna aleación o en tiempos más recientes en polímeros o materiales cerámicos. Su función principal es permitir la apertura o el cierre del flujo de agua a través de una tubería³³.

Figura 25. Llave de paso de $\frac{1}{4}''$



Fuente: elaboración propia

³³ ValvulasArco. (s.f.). Tipos y funcionamiento de las llaves de paso de agua. En Blog ValvulasArco. Recuperado de <https://blog.valvulasarco.com/tipos-y-funcionamiento-de-las-llaves-de-paso-de-agua>

Figura 26. Llave de paso de $\frac{1}{4}$ `` con manguera térmica.

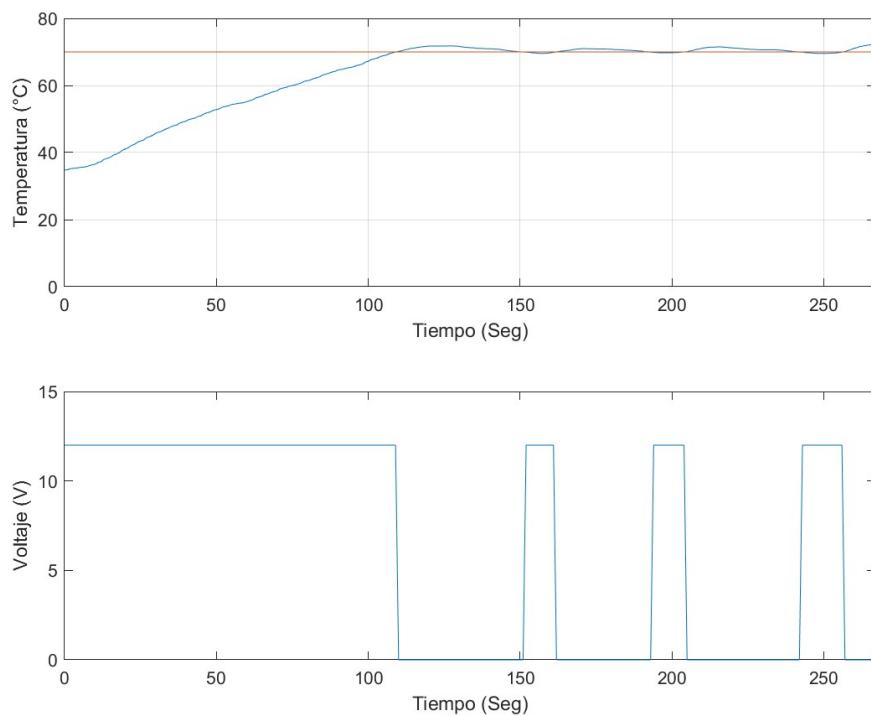


Fuente: elaboración propia

6. CONTROL DE TEMPERATURA

Con el fin de diseñar un control de temperatura para el sistema es necesario modelar la dinámica de la planta. Este proceso se realiza mediante una comunicación serial entre el Arduino y MatLab. La información del comportamiento de la planta se toma durante 9 minutos y se obtiene una gráfica de respuesta de su dinámica. Esto se realiza dos veces con diferentes temperaturas iniciales teniendo como control un módulo relé encargado de activar o desactivar el paso de corriente y además para estabilizar el sistema. A continuación, se muestra la respuesta del sistema con una temperatura inicial de 36 °C

Figura 27. Respuesta de la planta y control con relé prueba 1.

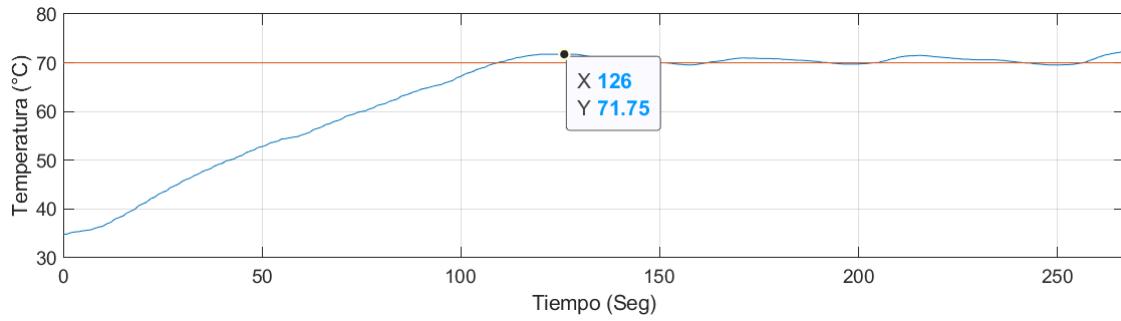


Fuente: elaboración propia

En la figura 27 se tienen dos gráficas, la gráfica de arriba relaciona las unidades de tiempo con la temperatura del agua dentro del calentador y en la segunda grafica se ve el funcionamiento del relé que está permitiendo o no el flujo de corriente al calentador.

A continuación, se muestra el valor máximo de temperatura obtenido en la prueba con 36 °C

Figura 28. Punto de máxima temperatura prueba 1.



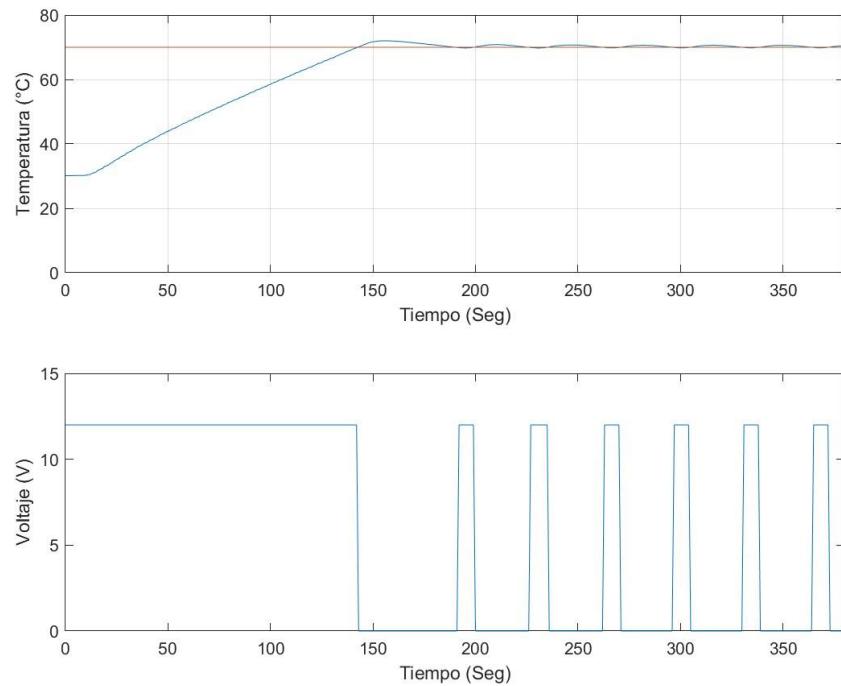
Fuente: elaboración propia

Teniendo el valor del mayor pico de temperatura se puede calcular el sobreimpulso de la siguiente manera.

$$Mp = 100 * \frac{X_{max} - X_{ss}}{X_{ss}} = 100 * \frac{71.75 - 70}{70} = 2.5\% \quad \text{Ecuación 6}$$

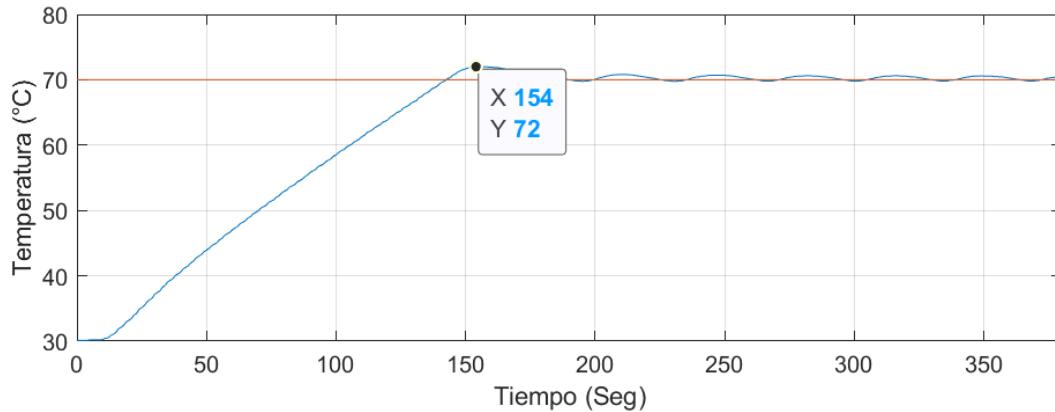
Se realiza la misma prueba, pero esta vez con una temperatura inicial de 30 °C.

Figura 29. Respuesta de la planta y control con relé prueba 2.



Fuente: elaboración propia

Figura 30. Punto de máxima temperatura prueba 2.

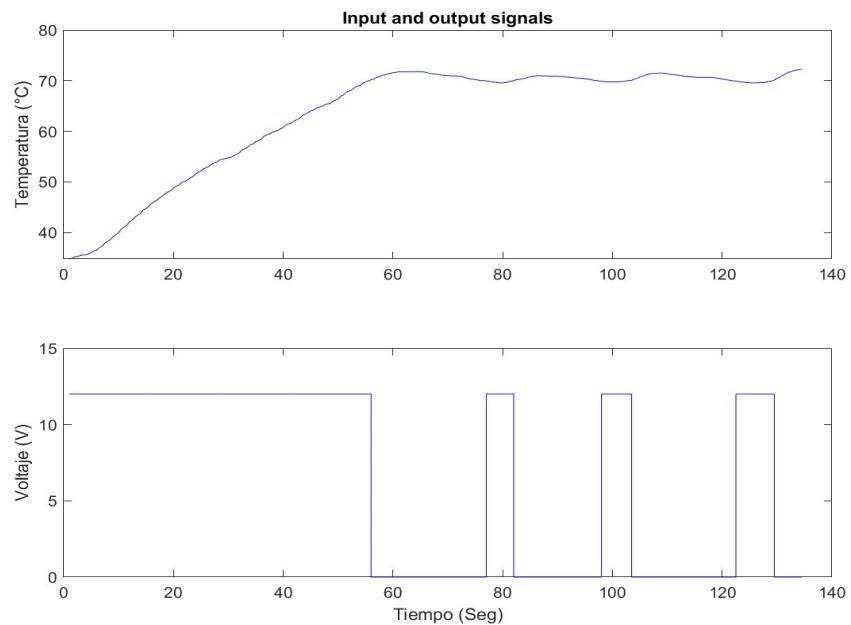


Fuente: elaboración propia

$$Mp = 100 * \frac{X_{max} - X_{ss}}{X_{ss}} = 100 * \frac{72 - 70}{70} = 2.85\%$$

Teniendo la respuesta de la planta se analizan los datos adquiridos para que mediante la herramienta de MatLab System Identification se pueda obtener una función de transferencia. A continuación, se muestran los datos ingresados a la herramienta donde se relacionan la entrada y la salida de la planta a través del tiempo.

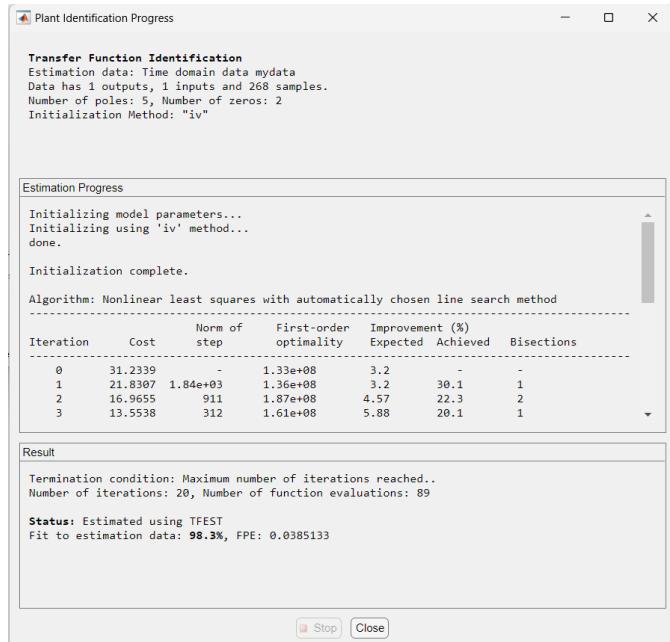
Figura 31. Gráfica de entrada y salida en System Identification.



Fuente: elaboración propia

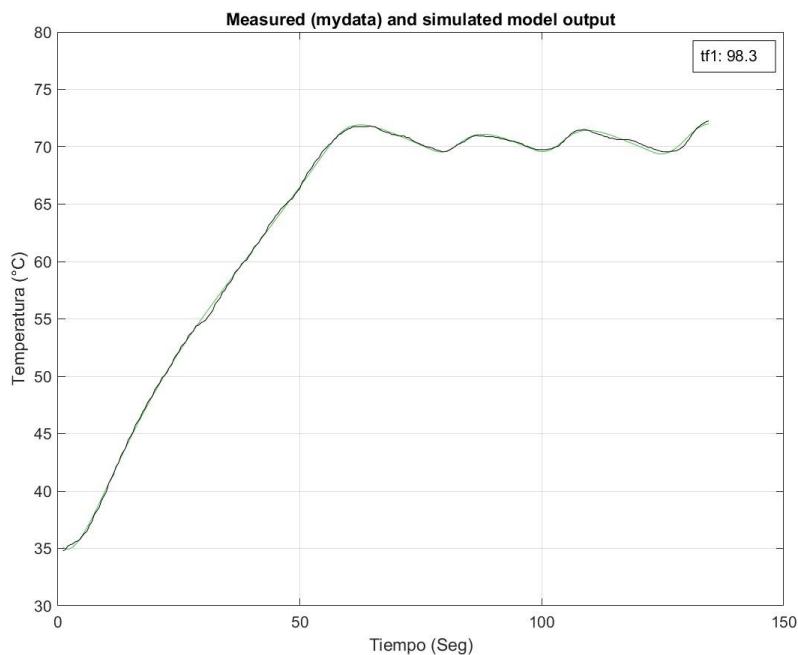
Para realizar el modelo se utiliza una estimación mediante función de transferencia utilizando una configuración de 5 polos y 2 zeros obteniendo un estimado de 98.3% con la información ingresada

Figura 32. Resultado de la estimación de la función de transferencia.



Fuente: elaboración propia

Figura 33. Modelo para función de transferencia escogido.



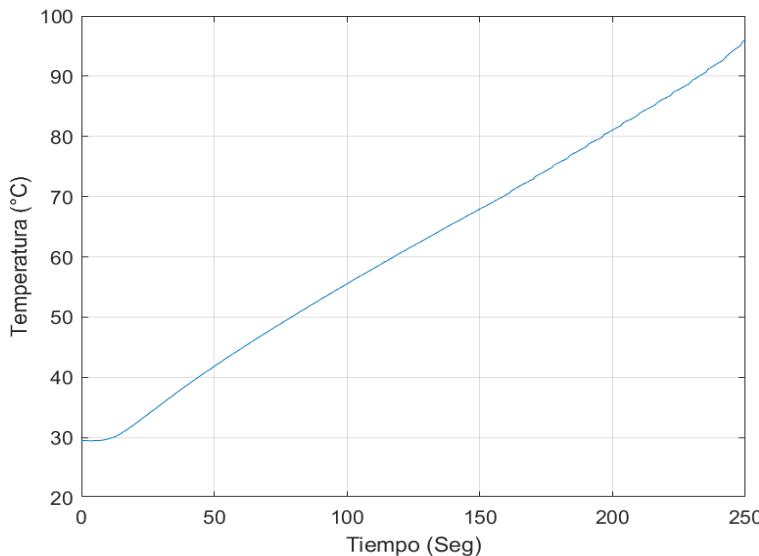
Fuente: elaboración propia

La Función de transferencia con mejor ajuste lograda con MatLab es mostrada en la Ecuación 7.

$$FT = \frac{0.01134s^2 + 0.001387s + 0.0001752}{s^5 + 0.9603s^4 + 0.2968s^3 + 0.0383s^2 + 0.00285s + 7.021e^{-6}}$$
 Ecuación 7

Teniendo en cuenta que el calentador cuando está activo sin ningún control solo sube de manera constante indefinidamente se analiza este sistema en lazo abierto.

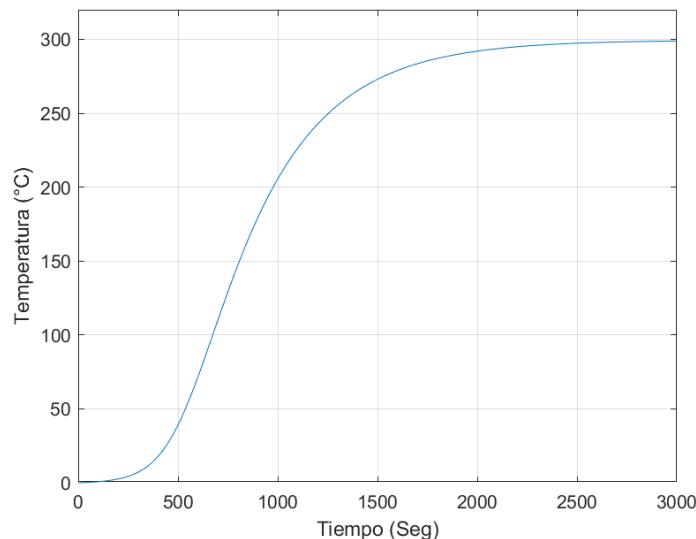
Figura 34. Respuesta del calentador en 7 minutos.



Fuente: elaboración propia

Como se ve en la figura anterior el comportamiento es de un incremento constante sin llegar a un límite ya que en las pruebas no es necesario tener más temperatura.

Figura 35. Respuesta sigmoidal con step.



Fuente: elaboración propia

Mediante las herramientas de simulación de MatLab analizando la función de transferencia en un mayor tiempo se ve que la gráfica de respuesta tiene una forma sigmoidal estabilizándose alrededor de los 300 °C pasado los 2000 segundos de simulación.

Con esta forma de respuesta se pueden calcular los valores de tiempo muerto (L) y tiempo de estabilización (T) de la función de transferencia obtenida. Mediante Matlab se analiza el tiempo muerto revisando la variación de los puntos de inicio y el tiempo de estabilización usando una tangente a la curva.

El valor de L es: 4.4823 Seg

El valor de Tao es: 398.9433 Seg

El factor de controlabilidad es: 0.0112

Con estos dos valores de T y L se construye el PID siguiendo las ecuaciones para del método Ziegler Nichols que se muestra en la tabla 4 en el capítulo 3.

Con estos valores y mediante el uso de MatLab se obtienen los valores para la ganancia proporcional (Kp), ganancia integral (Ki) y ganancia derivativa (Kd).

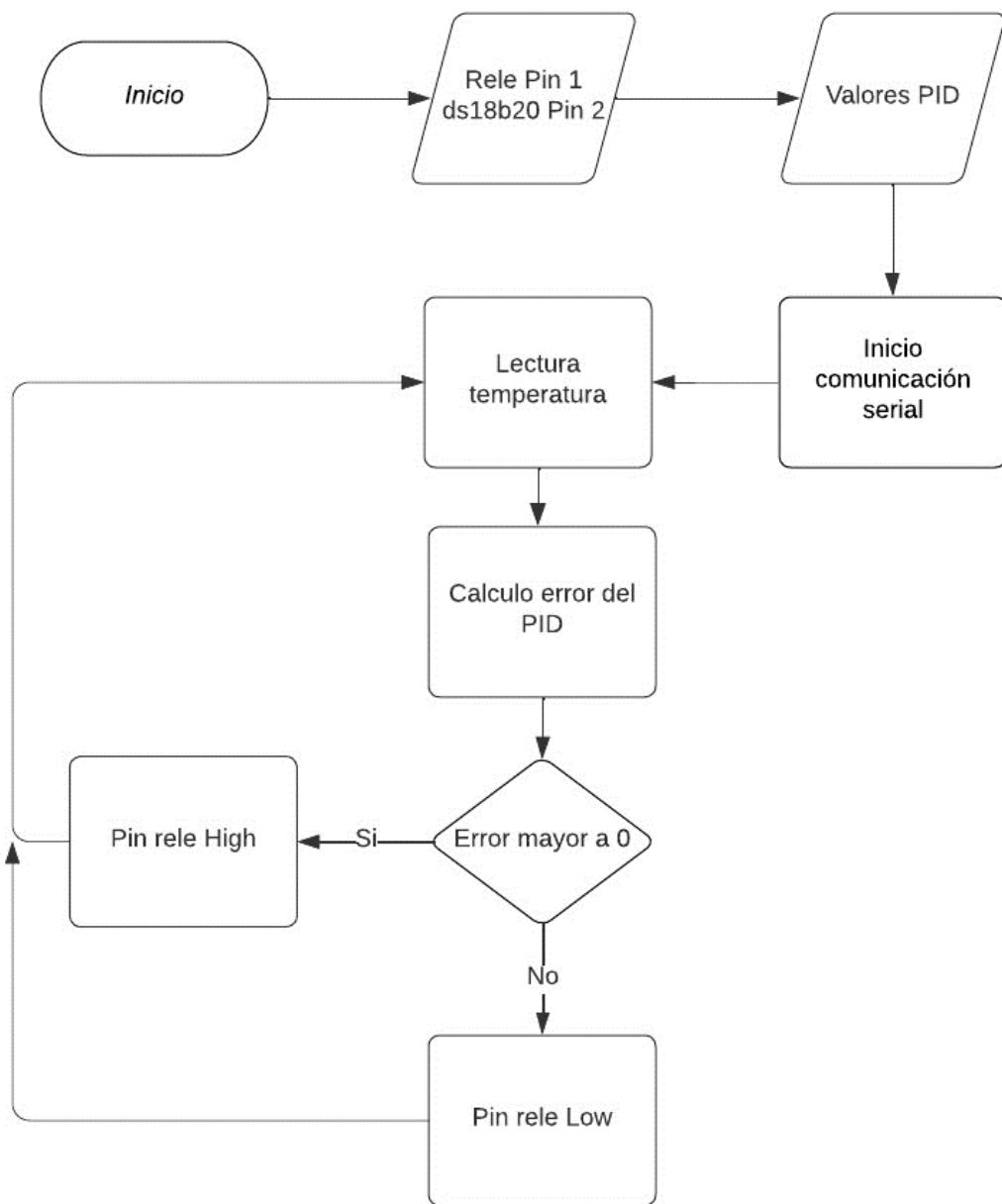
$$Kp = 1.2 * \left(\frac{Tao}{L} \right) = 106.8051 \quad \text{Ecuación 8}$$

$$Ki = \frac{Kp}{2*L} = 11.9141 \quad \text{Ecuación 9}$$

$$Kd = Kp * (0.5 * L) = 239.3660 \quad \text{Ecuación 10}$$

Con estos valores se puede construir un control PID digital usando el microcontrolador Arduino con el fin de mantener la variable de la temperatura en el valor deseado, que en este caso es 70 °C. Para este proceso se establecen los parámetros del PID teniendo en cuenta los valores de ganancia proporcional, integral y derivativa, así como los límites para estos valores. Con esto se calcula las respectivas componentes en función del error entre la temperatura actual y la temperatura deseada. A medida que los valores de temperatura son más alejados el error que se entrega estará en el máximo que va a ser 100 y a medida que este se acerca más a los 70 °C este valor empieza a bajar para poder controlar la temperatura. De esta manera se garantiza una regulación eficaz de la variable de interés en aplicaciones que requieren un control preciso.

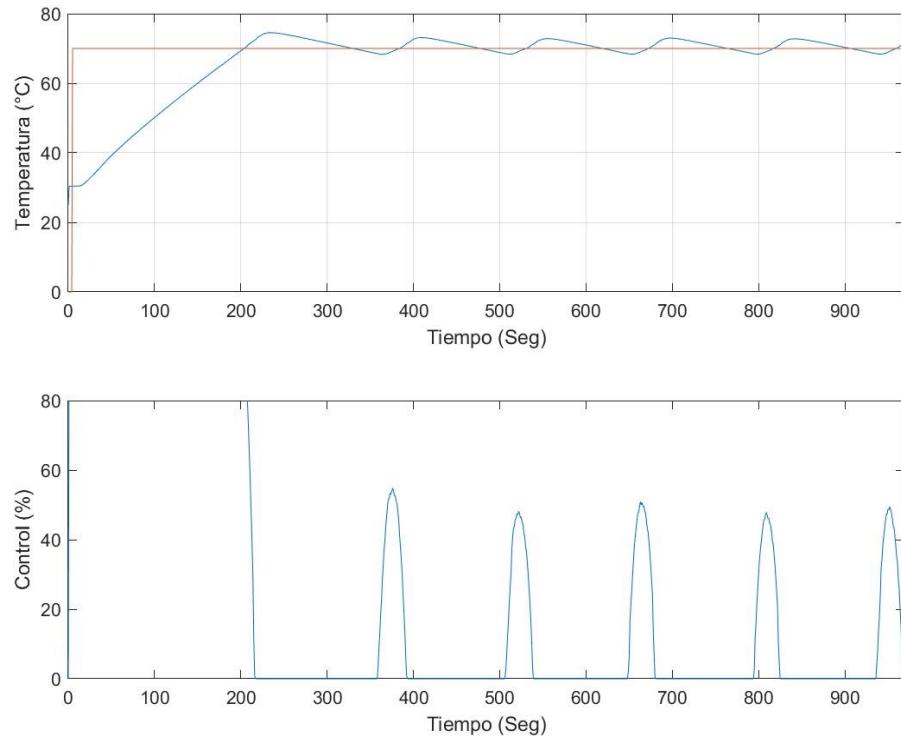
Figura 36. Diagrama de flujo del código implementado en el Arduino.



Fuente: elaboración propia

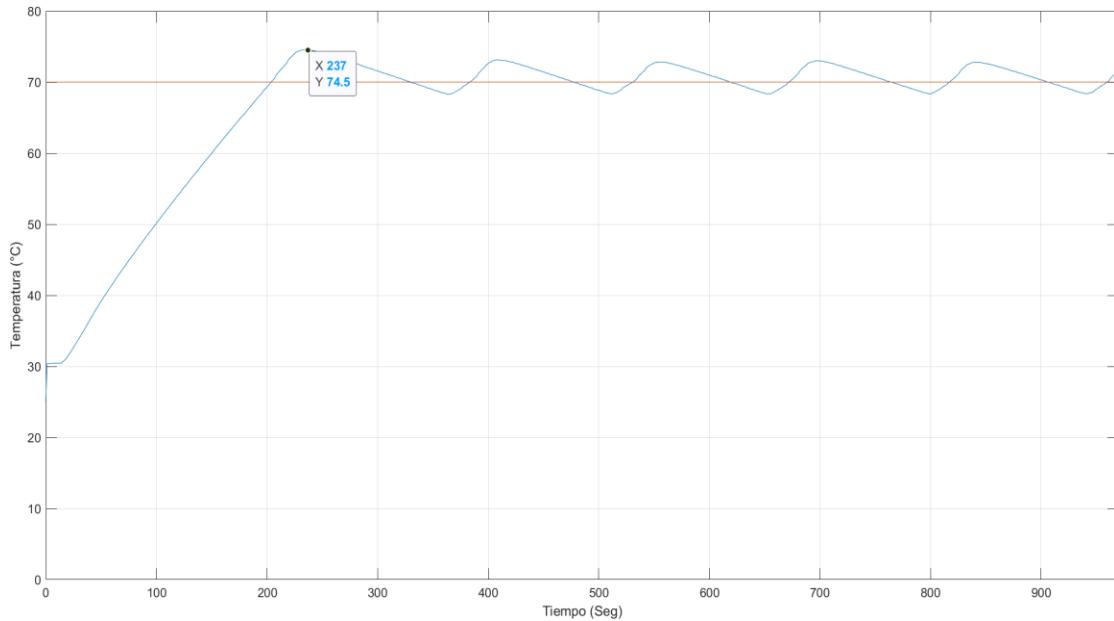
Con este control implementado se proceden a realizar pruebas variando el setpoint para verificar el desempeño del sistema. A continuación, se muestran los resultados.

Figura 37. Control PI con setpoint en 70 °C.



Fuente: elaboración propia

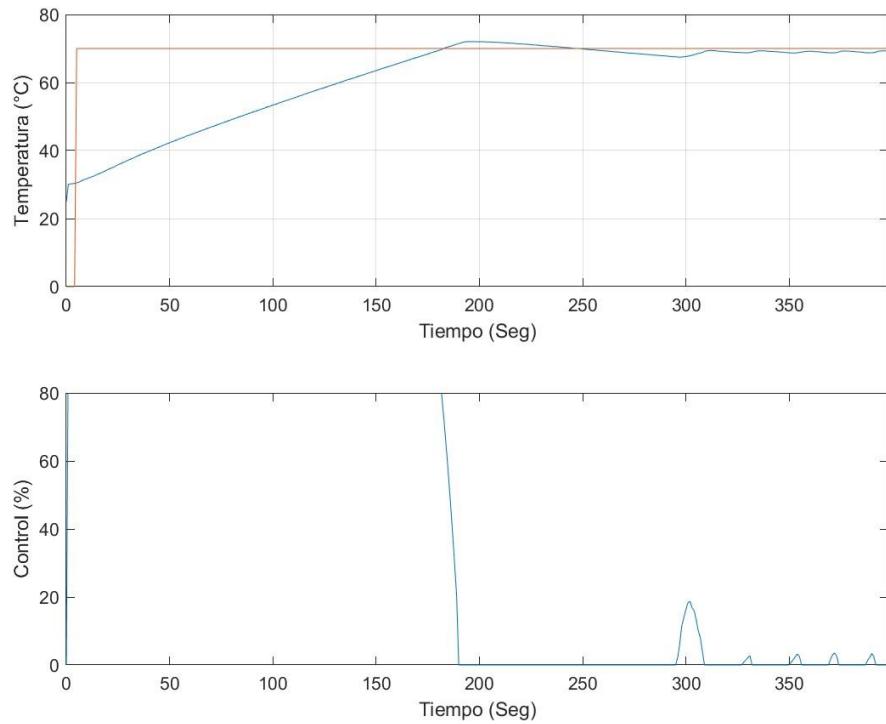
Figura 38. Punto máximo de temperatura con setpoint en 70 °C.



Fuente: elaboración propia

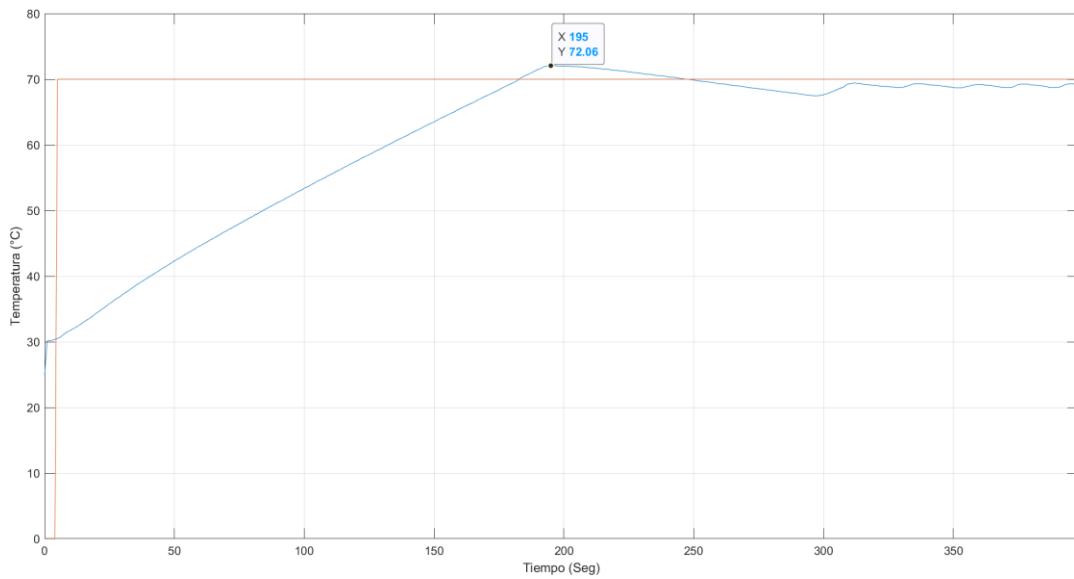
$$Mp = 100 * \frac{X_{max} - X_{ss}}{X_{ss}} = 100 * \frac{74.56 - 70}{70} = 6.52\%$$

Figura 39. Control PI con setpoint en 69 °C.



Fuente: elaboración propia

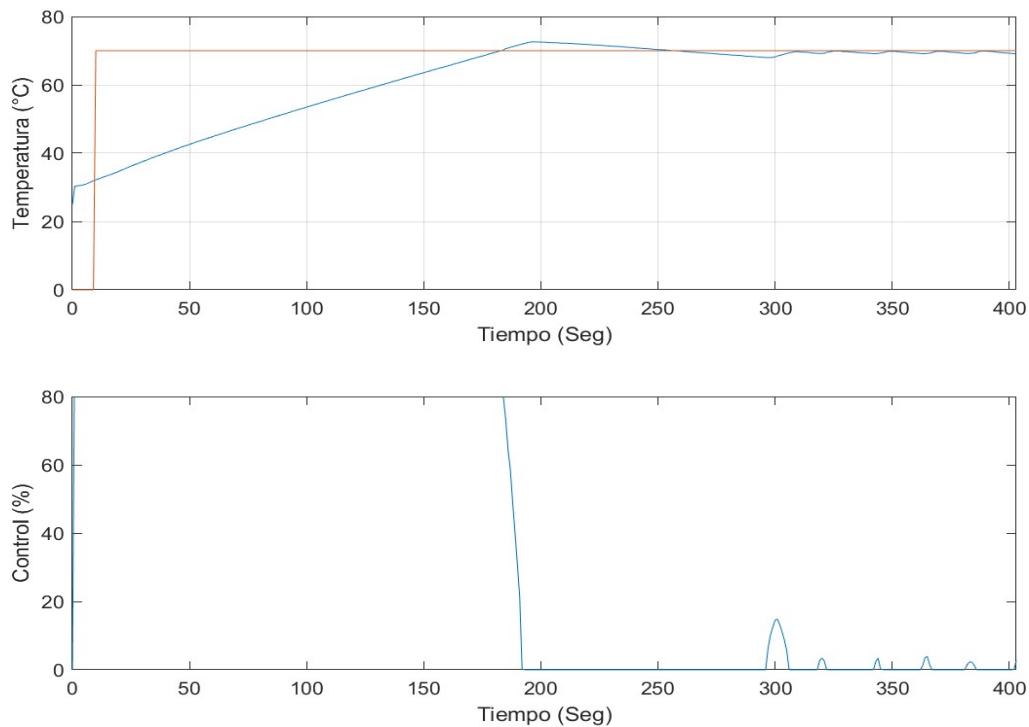
Figura 40. Punto máximo de temperatura con setpoint en 69 °C.



Fuente: elaboración propia

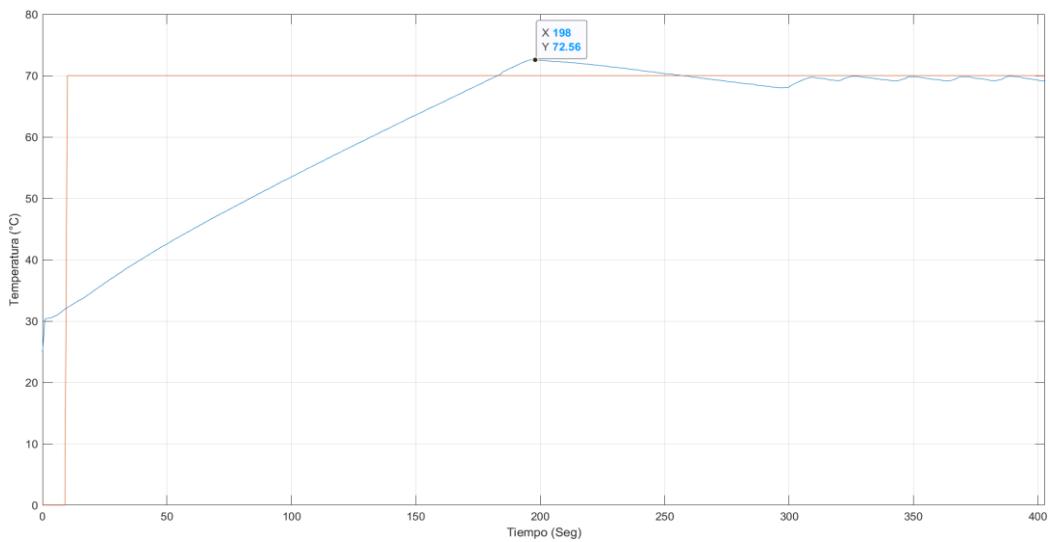
$$Mp = 100 * \frac{X_{max} - X_{ss}}{X_{ss}} = 100 * \frac{72 - 70}{70} = 2.85\%$$

Figura 41. Control PI con setpoint en 69.5 °C.



Fuente: elaboración propia

Figura 42. Punto máximo de temperatura con setpoint en 69.5 °C.



Fuente: elaboración propia

$$Mp = 100 * \frac{X_{max} - X_{ss}}{X_{ss}} = 100 * \frac{72.56 - 70}{70} = 3.65\%$$

Analizando las diferentes pruebas se observa que la mejor respuesta se encuentra con un set point de 69.5 °C en la que se presenta un sobre impulso de 3.65% el cual es mayor comparado a la prueba de 69 °C al tener 2.85 %, pero el error en estado estacionario es menor y está más cercano a los 70 °C que es la temperatura ideal para realizar el proceso.

Desde el punto de vista energético, una señal de control más suave y menos variable implica una menor demanda de energía, ya que evita cambios bruscos y oscilaciones en el sistema. Por lo tanto, la configuración con un setpoint de 69 °C podría considerarse más eficiente energéticamente debido a su menor sobreimpulso.

Es importante tener en cuenta que, además de la eficiencia energética, otros factores como el tiempo de estabilización del sistema y la capacidad de mantener la temperatura cerca del setpoint en condiciones variables también son críticos en la evaluación global del desempeño del sistema de control de temperatura.

7. RESULTADOS

7.1 Resultados de la fase experimental sobre las plantas.

Se determinaron los efectos del estrés térmico en la coca. En cuanto a las hojas, divididas en dos grupos, se descubrió que la exposición a temperaturas entre 70 y 90 °C resultó en la muerte de todas las hojas. El tiempo de exposición no influyó significativamente en los resultados. Además, se observó que temperaturas más bajas, entre 50 y 60 °C, causaron daños menores como quemaduras o marchitamiento, aunque las hojas se recuperaron en algunos casos. Estos hallazgos indican que no es necesario un calor extremo para provocar la caída de las hojas, y esto generalmente ocurrió entre 6 y 10 días después de la exposición.

Tabla 11. Siglas de los estados de las plantas a lo largo de las pruebas.

| | |
|-----|---|
| NC | No hubo cambios |
| QH | Se notan manchas por quemadura en las hojas |
| HM | Algunas hojas marchitas |
| HS | Se notan hojas secas |
| HTS | Hojas secas y parte del tallo seco |
| DG | Decaimiento general |
| MG | Se ve un marchitamiento lento y progresivo con daño en toda la planta |
| S | Secado total |
| M | Muerte de la planta |
| C | Hoja caída |
| MS | Se nota marchitez en gran parte de la hoja |
| H | Hace referencia a hoja |

Fuente: elaboración propia

Tabla 12. Resultados de las pruebas realizadas en hojas en el árbol 1.

| | | Árbol 1 | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|----|---------|----|----|------|----|----|------|----|----|------|----|----|------|----|----|
| | | 70°C | | | 75°C | | | 80°C | | | 85°C | | | 90°C | | |
| Tiempo(s) | | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 |
| Rama 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | QH | QH | QH | QH | QH | QH | QH | QH | QH | QH | QH | QH | QH | QH | QH | QH |
| 10 | QH | QH | QH | QH | QH | QH | MS | MS | MS | QH | QH | QH | MS | MS | MS | MS |
| 15 | MS | MS | MS | MS | MS | MS | S | S | S | MS | MS | MS | MS | MS | MS | MS |
| 20 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | MS | MS | MS | S | S | S | S |
| Rama 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| 10 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| 15 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| 20 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| Rama 3 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | S | C | C | S | C | C | S | S | C | S | S | S | C | C | C | C |
| 10 | C | C | C | S | C | C | S | S | C | S | C | C | S | S | S | C |
| 15 | C | C | C | S | S | C | S | S | S | S | S | S | S | S | S | C |
| 20 | C | C | C | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | C |
| Rama 4 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | S | C | C | S | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C |
| 10 | C | C | C | S | C | C | S | S | S | C | C | C | C | C | C | C |
| 15 | C | C | C | S | C | C | S | S | S | S | S | C | C | C | C | C |
| 20 | C | C | C | S | S | S | S | S | C | C | C | S | S | S | C | C |

Fuente: elaboración propia

Tabla 13. Resultados de las pruebas realizadas en hojas en el árbol 2.

| | | Árbol 2 | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|----|---------|----|----|------|----|----|------|----|----|------|----|----|------|----|----|
| | | 70°C | | | 75°C | | | 80°C | | | 85°C | | | 90°C | | |
| Tiempo(s) | | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 |
| Rama 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | QH | QH | QH | QH | QH | QH | QH | MS | MS | MS | MS | MS | MS | MS | MS | MS |
| 10 | QH | QH | QH | QH | QH | QH | QH | QH | QH | QH | MS | MS | MS | S | S | S |
| 15 | MS | MS | MS | MS | MS | MS | QH | QH | QH | MS | MS | MS | S | S | S | |
| 20 | S | S | S | S | S | S | QH | QH | QH | MS | MS | MS | S | S | S | |
| Rama 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | |
| 10 | S | S | S | MS | MS | MS | | S | S | S | S | S | S | S | S | |
| 15 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | |
| 20 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | |
| Rama 3 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | C | C | C | C | S | C | C | S | S | C | C | C | C | S | S | C |
| 10 | S | S | C | S | S | C | C | C | C | S | S | S | S | S | S | C |
| 15 | S | C | C | S | S | S | S | S | S | C | C | S | S | S | S | C |
| 20 | S | S | S | S | S | C | C | C | C | S | S | S | S | S | S | C |
| Rama 4 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C |
| 10 | C | C | C | C | C | C | S | S | C | C | C | C | S | S | S | C |
| 15 | C | C | C | C | C | C | C | C | C | S | S | S | C | C | C | C |
| 20 | C | C | C | S | S | S | C | C | C | S | S | C | S | C | C | C |

Fuente: elaboración propia

Tabla 14. Resultados de las pruebas realizadas en hojas en el árbol 3.

| | | Árbol 3 | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|----|---------|----|----|------|----|----|------|----|----|------|----|----|------|----|----|
| | | 70°C | | | 75°C | | | 80°C | | | 85°C | | | 90°C | | |
| Tiempo(s) | | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 | H1 | H2 | H3 |
| Rama 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | MS | MS | MS | QH | QH | QH | MS | MS | MS | MS | MS | MS | MS | MS | MS | MS |
| 10 | MS | MS | MS | MS | MS | MS | S | S | S | MS | MS | MS | S | S | S | S |
| 15 | MS | MS | MS | MS | MS | MS | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| 20 | MS | MS | MS | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| Rama 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| 10 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| 15 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| 20 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| Rama 3 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | S | S | S | S | S | C | C | C | C | S | S | S | S | S | S | S |
| 10 | S | S | S | S | S | C | S | S | S | S | S | S | S | C | C | |
| 15 | S | S | S | S | S | C | S | S | C | S | S | S | S | C | C | |
| 20 | S | S | S | S | S | C | S | C | C | S | S | S | S | S | S | S |
| Rama 4 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C | C |
| 10 | C | C | C | S | S | C | C | C | C | S | S | S | S | S | S | S |
| 15 | S | S | S | S | C | C | S | S | C | S | S | S | S | C | C | |
| 20 | S | S | S | C | C | C | C | C | C | S | S | C | C | C | C | |

Fuente: elaboración propia

En la segunda parte del experimento, con la exposición de los cogollos de 3 plantas a un estrés térmico se logró determinar que solo las partes en contacto directo resultaron muertas, el resto de la planta no tuvo ningún efecto visual notorio y como método de compensación por la pérdida del cogollo principal las plantas siguieron el crecimiento normal.

Tabla 15. Resultados de las pruebas realizadas en cogollos.

| | | Cogollo | | |
|------|--|---------------|---------|---------|
| | | 80 °C y 10 s. | | |
| Días | | Árbol 1 | Árbol 2 | Árbol 3 |
| 1 | | MS | MS | MS |
| 2 | | S | S | S |
| 3 | | S | S | S |
| 4 | | S | S | S |

Fuente: elaboración propia

En la tercera parte basada en la exposición a estrés térmico de los tallos principales de algunas plantas se pudo determinar que no hubo ningún efecto visible que indicará que este tipo de aplicación llegará a afectar de manera significativa las plantas, por lo tanto, se consideró no relevante.

Tabla 16. Resultados de las pruebas realizadas en tallos.

| Tallo | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 80 °C | | | 90 °C | | |
| Árbol 1 | Árbol 2 | Árbol 3 | Árbol 4 | Árbol 5 | Árbol 6 |
| NC | NC | NC | NC | NC | NC |
| NC | NC | NC | NC | NC | NC |
| NC | NC | NC | NC | NC | NC |
| NC | NC | NC | NC | NC | NC |

Fuente: elaboración propia

En la cuarta parte de la experimentación se buscó determinar el impacto del estrés térmico en la planta aplicado principalmente en la parte de la raíz y una parte del tallo principal. Esta se divide en dos grupos, en el primero se logró determinar que al usar una temperatura de 70 °C con una cantidad de 500 mililitros la planta sufrió un secado de la hoja a los 8 días, posteriormente a los 14 días también el tallo se notó seco y finalmente se determinó la muerte de la planta a los 20 días después de la aplicación. En el segundo grupo se determinó que al reducir la temperatura a los 60 °C se generó un leve marchitamiento en las hojas; sin embargo, se dio una posterior recuperación en cada una de las plantas.

Tabla 17. Resultados de primera prueba con aplicación tallo-raíz vs días.

| Temp70 °C - 500ml | | |
|-------------------|---------|---------|
| Días | Árbol 1 | Árbol 2 |
| 2 | DG | DG |
| 4 | MG | MG |
| 6 | MG | MG |
| 8 | HS | HS |
| 10 | HS | HS |
| 14 | HTS | HTS |
| 16 | S | S |
| 18 | S | S |
| 20 | M | M |

Tabla 18. Resultados pruebas tallo raíz.

| Días | Tallo raíz | | |
|------|------------|---------|---------|
| | Árbol 1 | Árbol 2 | Árbol 3 |
| 4 | NC | NC | NC |
| 8 | HM | NC | NC |
| 12 | HS | HM | HS |
| 16 | NC | NC | NC |
| 20 | NC | NC | NC |

Fuente: elaboración propia

En la quinta parte se hicieron pruebas con temperaturas de 50, 60 y 70°C en tres árboles, pero esta vez para observar si se encuentran cambios respecto al tiempo de exposición, para esto se toman 5 y 15 segundos. La fecha que se realizó la aplicación fue el 26/11/2022, observando así los días 10, 14 y 18 posterior a la aplicación. Como resultado de estas pruebas se tiene que al igual que las pruebas anteriores el secado total de la planta se da con una temperatura de 70 °C y que el tiempo de exposición no influye en el resultado.

En la quinta parte de la fase experimental en la cual se expusieron las plantas a una aspersión general, solo las 3 plantas que se expusieron a una temperatura de 70 °C con una cantidad de 500 mililitros presentaron cambios valorables, una de ellas en el día 20 de seguimiento se mostró con marchitez en sus hojas; sin embargo, se recuperó sin problema. Las otras dos plantas presentaron signos de marchitamiento desde el día 8, posteriormente el día 16 la planta en general se tornó seca para finalmente el día 20 determinar su muerte.

Tabla 19. Resultados de aplicación tallo-raíz vs días.

| Días | Temp 50 °C - 750ml | | | Temp 70 °C - 750ml | | | Temp 50 °C - 500ml | | | Temp 70 °C - 500ml | | |
|------|--------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------------------|---------|---------|
| | Arbol1 | Arbol2 | Arbol3 | Arbol4 | Arbol5 | Arbol6 | Arbol7 | Arbol8 | Arbol9 | Arbol10 | Arbol11 | Arbol12 |
| 2 | NC | NC | NC | QH | QH | QH | NC | NC | NC | HM | NC | NC |
| 4 | NC | NC | NC | QH | QH | QH | NC | NC | NC | HM | NC | NC |
| 6 | NC | QH | NC | QH | QH | QH | NC | NC | NC | HS | QH | QH |
| 8 | QH | NC | QH | HM | HM | HM | NC | NC | NC | HS | HM | HM |
| 10 | NC | NC | NC | HS | HS | HM | NC | NC | NC | HS | HM | HM |
| 14 | HM | HM | NC | HS | HS | HS | HM | NC | HM | NC | NS | NS |
| 16 | NC | NC | HM | HTS | HS | HS | NC | HM | NC | HTS | HTS | S |
| 18 | HS | NC | NC | HTS | HTS | HS | HS | NC | HS | HTS | HTS | S |
| 20 | NC | HS | HS | HTS | HTS | HTS | NC | HS | NC | S | S | S |

Otra parte importante en la aspersión completa es que la cantidad de líquido a usar varía dependiendo del tamaño de la planta en cuestión pues entre más follaje presenten más líquido será necesario.

7.2 Funcionamiento del control PID.

Para comprobar el desempeño del control PID implementado en el prototipo se hicieron varias pruebas para analizar el tiempo en el que el sistema alcanzaba la temperatura deseada, el mayor valor de temperatura y por ende el sobreimpulso. A continuación, se muestran las pruebas realizadas con una temperatura inicial de 30, 32 y 36 °C. Algo a tener en cuenta es que estas pruebas se realizan con el setpoint en 69.5 °C debido a que en la fase de control se determinó que con este se obtenía la mejor respuesta y estabilización del sistema.

Tabla 20. Pruebas con temperatura inicial de 30 °C.

| Temperatura inicial 30 °C con setpoint en 69.5 °C | | | |
|---|--------------|-------------------|------------------|
| | Tiempo (min) | Valor máximo (°C) | Sobreimpulso (%) |
| Prueba 1 | 5.06 | 72.7 | 3.86 |
| Prueba 2 | 5.1 | 72.72 | 3.89 |
| Prueba 3 | 5.04 | 72.58 | 3.69 |
| Prueba 4 | 5 | 72.56 | 3.66 |
| Prueba 5 | 5.2 | 72.81 | 4.01 |

Fuente: elaboración propia

Tabla 21. Pruebas con temperatura inicial de 36 °C

Fuente:

| Temperatura inicial 36 °C con setpoint en 69.5 °C | | | |
|---|--------------|-------------------|------------------|
| | Tiempo (min) | Valor máximo (°C) | Sobreimpulso (%) |
| Prueba 1 | 4.14 | 71.75 | 2.5 |
| Prueba 2 | 4.23 | 72 | 2.86 |
| Prueba 3 | 4.16 | 71.82 | 2.6 |
| Prueba 4 | 4.25 | 72.3 | 3.29 |
| Prueba 5 | 4.12 | 71.72 | 2.46 |

elaboración propia

Tabla 22. Pruebas con temperatura inicial de 32 °C.

| Temperatura inicial 32 °C con setpoint en 69.5 °C | | | |
|---|--------------|-------------------|------------------|
| | Tiempo (min) | Valor máximo (°C) | Sobreimpulso (%) |
| Prueba 1 | 4.6 | 72.2 | 3.14 |
| Prueba 2 | 4.71 | 72.18 | 3.11 |
| Prueba 3 | 4.63 | 72.15 | 3.07 |
| Prueba 4 | 4.64 | 72.16 | 3.09 |
| Prueba 5 | 4.8 | 72.71 | 3.87 |

Fuente: elaboración propia

En las pruebas se observa que el tiempo requerido para llegar al estado estacionario varía de 4 a 5 minutos en función de la temperatura inicial. Esta variación se debe al tiempo que el calentador requiere para elevar la temperatura del tubo galvanizado, considerando tanto su grosor como la presencia de agua en su interior. A pesar de esta breve duración, es importante destacar que el material retiene su temperatura de manera efectiva durante un período significativo después de la prueba, lo que subraya su eficiencia en la retención térmica.

En cuanto al sobreimpulso, se registra una oscilación que varía entre 2.5 y 4.01, alcanzando su valor máximo en las temperaturas iniciales más bajas. No obstante, este nivel de sobreimpulso resulta adecuado para la aplicación específica en cuestión. Se debe destacar que la temperatura solo se eleva 2 °C por encima del valor deseado y se estabiliza en un corto período de tiempo, lo que demuestra ser adecuado para este propósito.

8. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO

8.1 Tiempo de trabajo del sistema.

Se hicieron algunas pruebas para determinar el tiempo en el cual el sistema logra la temperatura de 70 °C con 3 temperaturas iniciales, 30, 32 y 36 °C.

Tabla 23. Tiempo empleado con una temperatura inicial de 30°C.

| Temperatura inicial 30 °C | | |
|---------------------------|--------------|-------------------|
| | Tiempo (min) | Valor máximo (°C) |
| Prueba 1 | 5.06 | 72.7 |
| Prueba 2 | 5.1 | 72.72 |
| Prueba 3 | 5.04 | 72.58 |
| Prueba 4 | 5 | 72.56 |
| Prueba 5 | 5.2 | 72.81 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Tiempo empleado con una temperatura inicial de 36 °C.

| Temperatura inicial 36°C | | |
|--------------------------|--------------|-------------------|
| | Tiempo (min) | Valor máximo (°C) |
| Prueba 1 | 4.14 | 71.75 |
| Prueba 2 | 4.23 | 72 |
| Prueba 3 | 4.16 | 71.82 |
| Prueba 4 | 4.25 | 72.3 |
| Prueba 5 | 4.12 | 71.72 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Tiempo empleado con una temperatura inicial de 32 °C.

| Temperatura inicial 32°C | | |
|--------------------------|--------------|-------------------|
| | Tiempo (min) | Valor máximo (°C) |
| Prueba 1 | 4.6 | 72.2 |
| Prueba 2 | 4.71 | 72.18 |
| Prueba 3 | 4.63 | 72.15 |
| Prueba 4 | 4.64 | 72.16 |
| Prueba 5 | 4.8 | 72.71 |

Fuente: Elaboración propia

8.2 Comportamiento del Calentador por Inducción con circulación de agua.

El calentador por inducción ha demostrado un buen comportamiento en relación con el tiempo necesario para alcanzar una temperatura deseada de 70 °C. Este comportamiento está relacionado con la memoria térmica y el contenido de agua del sistema. A continuación, se mencionan algunas observaciones importantes.

Tiempo de calentamiento inicial: En la primera ocasión de uso, el calentador requiere entre 4 y 5 minutos aproximadamente para alcanzar los 70 °C desde la temperatura ambiente como se evidencia en las tablas de la sección 8.1. Esto se debe a que tanto el calentador como el agua comienzan a temperatura ambiente, lo que implica un mayor requerimiento de energía para elevar la temperatura.

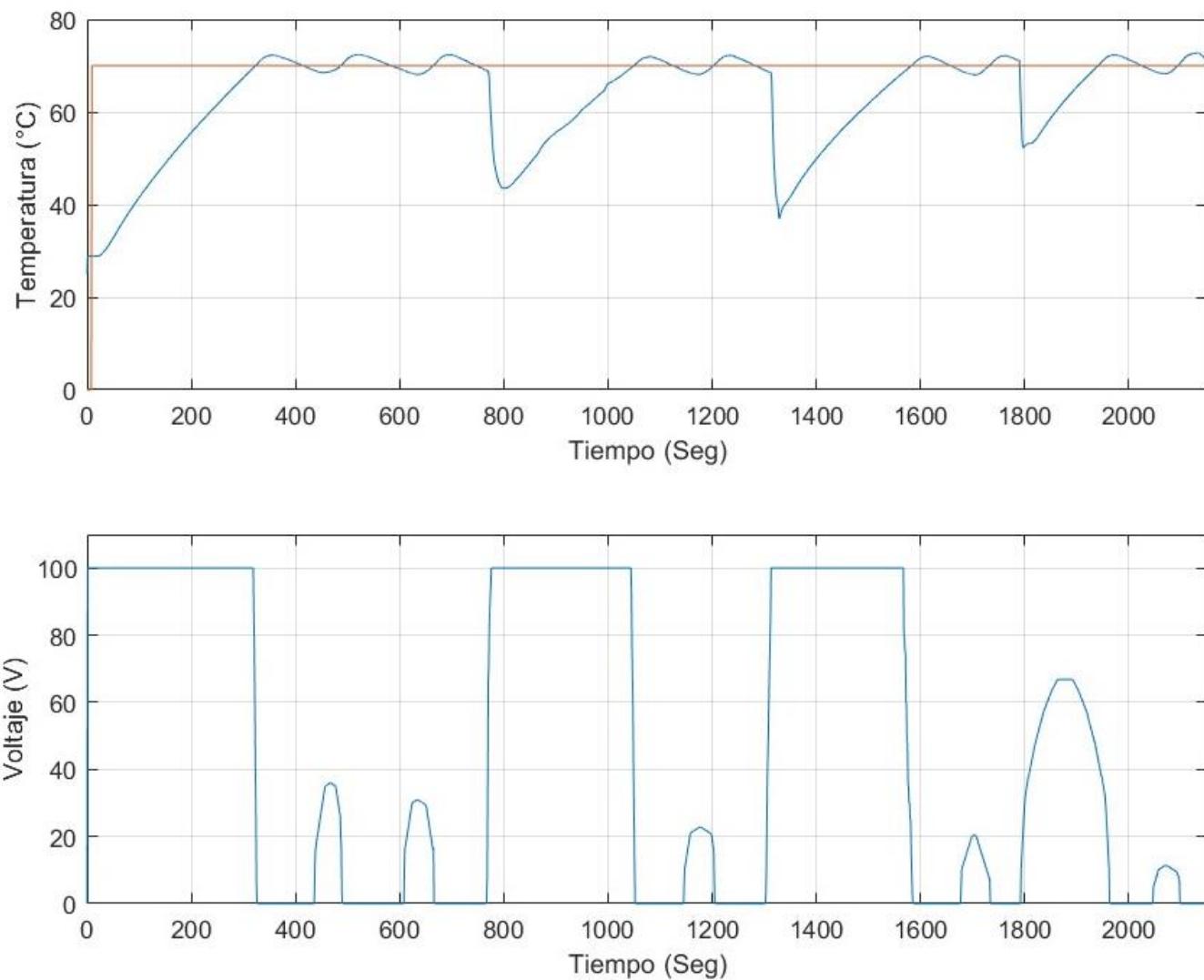
Efecto térmico en el acero: En sucesivas ocasiones, cuando el calentador se vacía y se vuelve a llenar, se observa una reducción en el tiempo requerido para alcanzar los 70 °C. Esto se debe al efecto de la memoria térmica, donde el tanque de acero y el agua retienen una cierta cantidad de calor residual de la última operación. Esto debido a que calentador no parte desde la temperatura ambiente, lo que resulta en una reducción del tiempo de calentamiento.

Variabilidad en el tiempo de calentamiento: Se debe a factores como la cantidad de agua circulada, la temperatura inicial del agua y la velocidad de circulación. Cuanto mayor sea la cantidad de agua y más caliente esté inicialmente, menor será el tiempo de calentamiento necesario. Además del ajuste manual de la llave de paso y la cantidad de agua que se introduce pueden influir en la temperatura inicial y, por lo tanto, en el tiempo requerido para alcanzar los 70 °C. En la figura 41 se observa que la mayor variación ocurre en la segunda circulación, esto debido a que se dejó circular más de una vez y por ende el acero se enfrió más que en las otras dos veces.

Eficiencia y control: Las observaciones sugieren que el calentador por inducción se beneficia de una mayor eficiencia en las operaciones subsiguientes, ya que no es necesario calentar desde la temperatura ambiente. Esto puede resultar en ahorro de energía y tiempo, el control manual del flujo de agua y el tiempo de calentamiento pueden utilizarse para ajustar la temperatura final deseada y minimizar el desperdicio de energía.

En resumen, el comportamiento observado en el calentador por inducción se relaciona directamente con la memoria térmica, la cantidad de agua y la temperatura inicial del sistema. Estos factores deben ser considerados en la operación y el control del calentador para lograr una temperatura deseada de manera eficiente. Ajustar el flujo de agua y el tiempo de calentamiento pueden ser estrategias útiles para optimizar el rendimiento del sistema y ahorrar energía.

Figura 43. Gráfica con las respuestas de la planta a la circulación de agua.



Fuente: Elaboración propia

8.3 Costos

Tabla 26. Costos de los materiales usados en el proyecto.

| Nombre | Cant. | Valor Unitario | Recurso Usco | Recurso Facultad | Entidad Financiadora |
|---------------------------|-------|----------------|--------------|------------------|----------------------|
| Calentador ZVS | 1 | 60.000 | NO | NO | Tesista |
| Sensor DS18b20 | 1 | 25.000 | NO | NO | Tesista |
| Tanque de acero | 1 | 20.000 | NO | NO | Tesista |
| Rele 30 A | 1 | 45.000 | NO | NO | Tesista |
| Ventilador | 1 | 52.000 | NO | NO | Tesista |
| Fuente de voltaje | 1 | 95.000 | NO | NO | Tesista |
| Manguera termorresistente | 1 m | 15.000 | NO | NO | Tesista |
| Llave de paso | 1 | 10.000 | NO | NO | Tesista |
| Bobina de cobre | 1 | 30.000 | NO | NO | Tesista |
| Arduino UNO | 1 | 50.000 | NO | NO | Tesista |
| Componentes varios | 1 | 90.000 | NO | NO | Tesista |
| Plantas de coca | 27 | 20.000 | NO | NO | Tesista |
| Total | | 1.032.000 | | | |

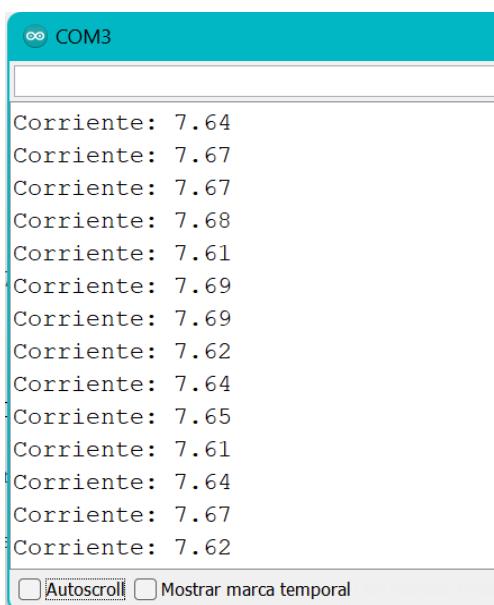
Fuente: Elaboración propia

Se ha realizado una inversión inicial de \$492,000 en el desarrollo del prototipo del sistema. Es importante destacar que, si se lleva a cabo una producción a gran escala, es probable que estos costos unitarios disminuyan significativamente, lo que redundaría en un impacto positivo en los márgenes de beneficio. Además, una de las ventajas clave del sistema es su bajo costo de mantenimiento, ya que su diseño robusto y eficiente reduce la necesidad de intervenciones regulares. De igual manera, su interfaz de usuario amigable hace que el manejo del sistema sea intuitivo y sencillo, lo que minimiza la capacitación necesaria. En resumen, con una inversión inicial sólida, se puede anticipar una rentabilidad a largo plazo y un sistema que requiere un mantenimiento mínimo, lo que contribuye a maximizar el retorno de la inversión.

8.4 Potencia en el sistema

Se hizo una medición de corriente con el sensor ACS 712, esto se hizo en funcionamiento para ver el consumo que tiene el calentador. Hay que tener en cuenta que el sensor delimita el flujo de corriente hacia el calentador, por lo cual la medida que arroja no es exacta, esto se evidencia en el funcionamiento, ya que normalmente el sistema se demora en llegar a los 70 °C entre 4 y 5 minutos dependiendo de la temperatura inicial y con el sensor se demora aproximadamente un 30 % más.

Figura 44. Corriente medida con el sensor ACS 712 con el calentador en funcionamiento.



```
Corriente: 7.64
Corriente: 7.67
Corriente: 7.67
Corriente: 7.68
Corriente: 7.61
Corriente: 7.69
Corriente: 7.69
Corriente: 7.62
Corriente: 7.64
Corriente: 7.65
Corriente: 7.61
Corriente: 7.64
Corriente: 7.67
Corriente: 7.62
```

Autoscroll Mostrar marca temporal

Fuente: Elaboración propia

Para calcular la potencia del sistema se tiene que el calentador se alimenta con 12v y con la corriente obtenida que es aproximadamente 7.6 A.

$$P = V * A = 12 * 7.6 = 91.2W$$

El sistema actualmente consume 91.2 W de energía como se ve en la ecuación anterior debido a que la fuente de alimentación es de 12V. Si se optara por una fuente de mayor capacidad, se podría aprovechar el sistema de manera más eficiente; sin embargo, es importante tener en cuenta que esta opción conlleva un costo adicional tanto en términos económicos como en el consumo de energía. Por lo tanto, se debe sopesar cuidadosamente los beneficios de un mayor rendimiento con los gastos y la carga ambiental asociada al incremento en el consumo energético.

9. CONCLUSIONES

Mediante pruebas experimentales se ha determinado que para inducir daños en las hojas de las plantas es necesario alcanzar una temperatura de 60 °C. Sin embargo, si el objetivo es afectar la estructura vegetal en su totalidad, la aplicación debe dirigirse al tallo-raíz a una temperatura de 70 °C o superior. En los experimentos realizados teniendo en cuenta que fueron con plantas pequeñas, en macetas, con las condiciones ambientales de Neiva que varían entre 30 y 40°C se observó que el 100 % de las plantas con estas características sufrieron daños irreversibles que llevaron a su fallecimiento. Es importante destacar que estos resultados pueden variar según las condiciones ambientales, el estado fisiológico de la planta, las características del suelo, el abono y otros factores.

El sistema implementado cumple con el objetivo de calentar el agua usando una topología ZVS, logra calentarla a aproximadamente 70 °C en un lapso de 4 a 5 minutos, dependiendo de la temperatura inicial. En comparación con alternativas convencionales como los calentadores a gas o eléctricos, este sistema destaca en diversos aspectos, pues no solo garantiza la eficiencia en el calentamiento, sino que también contribuye a la reducción de daños ambientales al minimizar la dependencia de combustibles fósiles y reducir la generación de residuos eléctricos, lo que lo convierte en una solución sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

La implementación del controlador PI en la planta desarrollada permite mantener la temperatura en un valor deseado a pesar de la presencia de un pequeño sobreimpulso inicial, que rara vez supera el 4% y de las oscilaciones iniciales. El sistema logra con éxito la estabilización a lo largo del tiempo, mitigando las fluctuaciones con respecto al valor de referencia. Sin embargo, los beneficios observados por el control PI no representan cambios significativos comparado con el control ON-OFF, por lo que se decide implementar este último control basándose en una evaluación integral de los resultados y requisitos del proyecto.

Se ha desarrollado un método de erradicación alternativo que ha demostrado ser eficiente en las pruebas. Sin embargo, es importante considerar algunas de sus implicaciones; en relación con el glifosato, este método se destaca por su menor impacto ambiental y en la salud, lo que lo convierte en una opción más segura y sostenible, aunque es más lento en su aplicación, al compararse con la erradicación manual. El diseño es una opción eficiente en términos de tiempo, sin embargo, también depende de la disponibilidad de personal para su operación, en última instancia, la elección del método de erradicación dependerá de las prioridades y recursos específicos de cada situación. Es importante tener en cuenta que este método necesita una gran inversión. La decisión deberá considerar cuidadosamente las necesidades ambientales, de salud y de recursos humanos en cada contexto particular.

10. DISCUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se puede evolucionar el sistema de almacenamiento de agua en el tanque para lograr un flujo constante y uniforme. Esta mejora sería un paso fundamental en la optimización del proyecto, ya que permitiría no solo mantener un suministro constante de agua, sino también extender su alcance para abarcar el riego de un mayor número de plantas. Esto contribuiría significativamente a la eficiencia del sistema.

Aumentar la capacidad de almacenamiento del tanque para satisfacer las necesidades de cada usuario. Hay que tener en cuenta que este aumento en la capacidad del tanque conlleva la necesidad de ajustar ligeramente la potencia del calentador para mantener la temperatura deseada. Este desarrollo permitirá no solo almacenar una mayor cantidad de agua, sino también asegurar que siempre esté disponible a la temperatura óptima, lo que ampliaría significativamente la versatilidad y la utilidad del sistema.

Otro desafío es cambiar la fuente de alimentación del proyecto. Actualmente, se basa en la energía eléctrica, pero en muchas aplicaciones reales, esta opción no está disponible. Por lo tanto, se debe investigar y desarrollar un método de alimentación alternativo, como un generador o una solución innovadora que permita garantizar el funcionamiento continuo y eficiente del sistema en diversas condiciones y ubicaciones, independientemente de la disponibilidad de electricidad en la red.

Reconociendo la importancia de la seguridad en el manejo de altas temperaturas en el proyecto, se debe pensar en la implementación de indicadores de seguridad y alertas para el usuario. Estos componentes adicionales no solo garantizarán un uso más seguro, sino que también proporcionarán información en tiempo real sobre las condiciones de temperatura, permitiendo al usuario tomar decisiones informadas y prevenir cualquier situación potencialmente peligrosa.

BIBLIOGRAFÍA

ACTIVESTATE. What is Tkinter used for and How to Install this Python Framework?. 21 de septiembre de 2021. Disponible en: <https://www.activestate.com/resources/quick-reads/what-is-tkinter-used-for-and-how-to-install-it/>.

ALEGRE GUTIÉRREZ, Enrique, et al. Procesamiento Digital de Imagen: Fundamentos y Prácticas Con Matlab [En línea]. Secretariado de Publicaciones y Medios Audiovisuales, 2003. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/229828279_Procesamiento_Digital_de_Imagenes_Fundamentos_y_Practicas_con_Matlab_Digital_image_processing_Fundamentals_and_practices_with_Matlab.

ARÉVALO, V. M.; GONZÁLEZ, J. y AMBROSIO, G. La Librería de Visión Artificial OpenCV Aplicación a la Docencia e Investigación. En: MAPIR Research Group [en línea]. 2017. Disponible en: <http://mapir.isa.uma.es/varevalo/drafts/arevalo2004lva1.pdf>.

ARISTOTELES. Política, Libro I. De la Sociedad Civil. De la Esclavitud. De la Propiedad. Del Poder Doméstico.

BAGNATO, Juan Ignacio. ¿Cómo funcionan las Convolutional Neural Networks? Visión por Ordenador [blog]. Aprende Machine Learning en español. Coruña, España. 29 de noviembre de 2018. Disponible en: <https://www.aprendemachinelearning.com/como-funcionan-las-convolutional-neural-networks-vision-por-ordenador/>

BAGNATO, Juan Ignacio. Sets de Entrenamiento, Test y Validación [blog]. Aprende Machine Learning en español. Coruña, España. 3 de marzo de 2020. Disponible en: <https://www.aprendemachinelearning.com/sets-de-entrenamiento-test-validacion-cruzada/>

BOTINA MONSALVE, et al. Clasificación Automática de las Vocales en el Lenguaje de Señas Colombiano. Disponible en: <https://repositorio.itm.edu.co/handle/20.500.12622/1038>.

CALVO, Diego. Función de activación – Redes neuronales [blog]. Diego Calvo. 7 de diciembre de 2018. Disponible en: <https://www.diegocalvo.es/funcion-de-activacion-redes-neuronales/>

CASTILLO, José Antonio. RGB qué es esto y para qué se utiliza en Informática [blog]. Profesional Review. 20 de enero de 2019. Disponible en: <https://www.profesionalreview.com/2019/01/20/rgb-que-es/>

CHALLENGER PÉREZ, Ivet; DÍAZ RICARDO, Yanet y BECERRA GARCÍA, Roberto Antonio. El lenguaje de programación Python. En: Ciencias Holguín [En línea.] 2014. vol. XX, no. 2. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181531232001>.

CHOLLET, Francois. Deep learning with python. [s.l.]: Manning Publications Co, 2018. 361 p. ISBN 9781617294433

CIENCIACINÉTICA. Redes Neuronales Convolucionales en Inteligencia Artificial (CNN) [blog]. INTELIGENCIA. 6 de junio de 2018. Disponible en: <https://inteligencia.tech/2018/06/06/redes-convolucionales-en-inteligencia-artificial/>

DeepAI. Computer Vision: What is Computer Vision? [En línea.]. Disponible en: <https://deepai.org/machine-learning-glossary-and-terms/computer-vision>.

DOMÍNGUEZ, Néstor A. Ética y Ecoética para la inteligencia artificial. En: Boletín del Centro Naval 856 [En línea.]. 2021. Disponible en: <https://www.centronaval.org.ar/boletin/BCN856/856-DOMINGUEZ.pdf>

GARCÍA SÁNCHEZ, Eugenio. Introducción a las redes neuronales de convolución. Aplicación a la visión por ordenador. Trabajo de grado. [s.l.]: Universidad de Zaragoza, 2019.

GONZÁLEZ MARCOS, Ana, et al. Técnicas y algoritmos básicos de visión artificial [en línea]. [s.l.]: Material didáctico. Ingenierías., 2006. Disponible en: <https://publicaciones.unirioja.es/catalogo/online/VisionArtificial.pdf>. ISBN 84-689-9345-X.

IBM. ¿Qué es Machine Learning? [En línea.]. IBM ANALÍTICA web site. Disponible en: <https://www.ibm.com/co-es/analytics/machine-learning>

IBM. What is Computer Vision?. [En línea.]. IBM ANALÍTICA web site. Disponible en: <https://www.ibm.com/topics/computer-vision>.

LOPEZ BRIEGA, Raul E. Introducción al Deep Learning [blog]. Matemáticas, análisis de datos y python. 13 de junio de 2017. Disponible en: <https://relopezbriega.github.io/blog/2017/06/13/introduccion-al-deep-learning/>

MEDIPIPE HANDS. Mediapipe [página web]. Disponible en: <https://google.github.io/mediapipe/solutions/hands.html>

MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL, INSTITUTO NACIONAL PARA SORDOS, INSOR. Diccionario Básico de la Lengua de Señas Colombiana por Instituto Nacional para Sordos INSOR [En línea.]. INSOR web site. Disponible en: http://www.insor.gov.co/descargar/diccionario_basico_completo.pdf

NVIDIA DEVELOPER. What is OpenCV? [En línea.]. NVIDIA Corporation web site. Disponible en: <https://developer.nvidia.com/opencv>

ORACLE COLOMBIA. ¿Qué es la Inteligencia Artificial-IA? [En línea.]. Oracle Colombia web site. Disponible en: <https://www.oracle.com/co/artificial-intelligence/what-is-ai>

PONCE GALLEGOS, Julio Cesar, et al. Inteligencia Artificial. [s.l.]: Iniciativa Latinoamericana de Libros de Texto Abiertos (LATIn), 2014. 225 p.

PORCELLI, Adriana Margarita. La Inteligencia Artificial y la Robótica: sus Dilemas Sociales, Éticos y Jurídicos. Derecho glob. Estud. Sobre Derecho Justicia [En línea.]. 2020, vol.6, n.16, pp.49-105. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-51362020000300049&lng=es&nrm=iso

RODRÍGUEZ, Daniel. ¿Cuál es la diferencia entre Parámetro e Hiperparámetro?. Analytics Lane. 16 de diciembre de 2019. Disponible en: <https://www.analyticslane.com/2019/12/16/cual-es-la-diferencia-entre-parametro-e->

hiperparametro/#:~:text=Los%20hiperpar%C3%A1metros%20de%20un%20modelo,por%20el%20cient%C3%ADfico%20de%20datos

ROZO MELO, Nancy. La Lengua de Señas Colombiana [En línea.]. Portal De Lenguas de Colombia: Diversidad y Contacto. Disponible en: <https://lenguasdecolombia.caroycervo.gov.co/contenido/Lenguas-de-senас-colombiana/introduccion>

SHIN, Terence. Comprensión de la Matriz de Confusión y Cómo Implementarla en Python. DataSource.AI. 20 de mayo de 2020. Disponible en: <https://www.datasource.ai/es/data-science-articles/comprehension-de-la-matriz-de-confusion-y-como-implementarla-en-python>

SILVA, Sarahí y FREIRE, Estefanía. Intro a las redes neuronales convolucionales. Bootcamp AI. 23 de noviembre de 2019. Disponible en: <https://bootcampai.medium.com/redes-neuronales-convolucionales-5e0ce960caf8>.

SITIOBIGDATA. Machine Learning: Selección Metricas de clasificación. sitiobigdata.com [página web]. Disponible en: <https://sitiobigdata.com/2019/01/19/machine-learning-metrica-clasificacion-parte-3/>.

TF.KERAS.PREPROCESSING.IMAGE.IMAGEDATAGENERATOR. TensorFlow [página web]. Disponible en: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/preprocessing/image/ImageDataGenerator.

TORRES SOLER, Luis. El Perceptrón Redes Neuronales Artificiales [En línea] 20 de enero de 2020. Repositorio Universidad Nacional. Disponible en: <https://disi.unal.edu.co/~lctorress/RedNeu/LIRna004.pdf>

TRIVIÑO LOPEZ, Iván. Sistema para el Aprendizaje del Lenguaje de Señas Colombiano usando Visión por Computador. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_automatizacion/159/.

UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES. RECOMENDACIÓN UIT-R BT.601-7: Parámetros de Codificación de Televisión Digital para Estudios con Formatos de Imagen Normal 4:3 y de Pantalla Ancha 16:9 [En línea]. Disponible en: https://web.archive.org/web/20220119174709/https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.601-7-201103-!!!PDF-S.pdf

UTRERA BURGAL, Jesús. Tratamiento de imágenes usando ImageDataGenerator en Keras [blog]. Technical thoughts, stories and ideas. 2 de agosto de 2019. Disponible en: <https://enmilocalfunciona.io/tratamiento-de-imagenes-usando-imagedatagenerator-en-keras/>

VELO FUENTES, Edward Joseph. Introducción a los métodos Deep Learning basados en Redes Neuronales [En línea]. Trabajo Fin de Máster. [s.l.]: Universidad de Coruña, 2020. Disponible en: http://eio.usc.es/pub/mte/descargas/ProyectosFinMaster/Proyecto_1654.pdf.

Civilpedia. (s.f.). ZVS Driver. Civilpedia. Recuperado de <https://civilpedia.org/p/?t=ZVS-Driver&pid=107>

MathWorks. (s.f.). MATLAB System Identification Toolbox. MathWorks. Recuperado de <https://la.mathworks.com/products/sysid.html>

EOS. (s.f.). Punto de Marchitez Permanente (PMP): ¿Qué es y por qué es importante para la agricultura? EOS. Recuperado de <https://eos.com/es/blog/punto-de-marchitez-permanente/>

Universidad Politécnica de Madrid. (s.f.). Inducción Electromagnética. Departamento de Física Aplicada. Recuperado de <https://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/magnet/induccion.html>

Tomi.digital. (s.f.). Ciclo de Vida de las Plantas. Recuperado de <https://tomi.digital/es/56110/ciclo-de-vida-de-las-plantas>

Naylamp Mechatronics. (s.f.). *Tutorial: Sensor de Corriente ACS712*. [En línea]. Disponible en: https://naylampmechatronics.com/blog/48_tutorial-sensor-de-corriente-acs712.html [6/9/2023].

Cómo Funciona. (s.f.). Una bobina. [En línea]. Disponible en: <https://como-funciona.co/una-bobina/> [22/10/2023].

Universidad Nacional de Tucumán. (2016). Análisis de Respuestas Transitorias: Sistemas de 2do Orden (Documento en línea). Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Recuperado de https://catedras.facet.unt.edu.ar/sistemasdecontrol/wp-content/uploads/sites/101/2016/04/4_An%C3%A1lisis-de-Respuestas-Transitorias_Sistemas-de-2do-Orden_2016-1.pdf

Universidad Técnica de Cotopaxi. (s.f.). Título del recurso (o nombre del documento, si está disponible) [Documento en línea]. Repositorio UTC. Recuperado de <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/4371>

Universidad de Chile. (s.f.). Título del recurso (o nombre del documento, si está disponible) [Documento en línea]. Repositorio de la Universidad de Chile. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102050>

Control Automático Educación. (s.f.). Lazo abierto y lazo cerrado. En Control Automático Educación. Recuperado de <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/lazo-abierto-y-lazo-cerrado/>

Camarillo, A. (2021). Qué es un control PID. En 330ohms Blog. Recuperado de <https://blog.330ohms.com/2021/06/02/que-es-un-control-pid/>

Naylamp Mechatronics. (30/07/2016). Tutorial: Sensor Digital de Temperatura DS18B20. Recuperado de https://naylampmechatronics.com/blog/46_tutorial-sensor-digital-de-temperatura-ds18b20.html#:~:text=El%20DS18B20%20es%20un%20sensor,sensor%20en%20el%20mismo%20bus

ANEXOS

Anexo A. Pruebas realizadas en hojas con temperaturas desde 70 a 90 °C.

Primeras pruebas realizadas en hojas.

Tabla 27. Prueba en hojas con 70 °C.

| 70°C | Árbol 1 | Árbol 2 | Árbol 3 |
|-------|---|--|---|
| 5seg |  |  |  |
| 10seg |  |  |  |
| 15seg |  |  |  |
| 20seg |  |  |  |

Tabla 28. Prueba en hojas con 75 °C.

| 75°C | Árbol 1 | Árbol 2 | Árbol 3 |
|-------|---|--|---|
| 5seg |  |  |  |
| 10seg |  |  |  |
| 15seg |  |  |  |
| 20seg |  |  |  |

Tabla 29. Prueba en hojas con 80 °C.

| 80°C | Árbol 1 | Árbol 2 | Árbol 3 |
|-------|---|--|---|
| 5seg |  |  |  |
| 10seg |  |  |  |
| 15seg |  |  |  |
| 20seg |  |  |  |

Tabla 30. Prueba en hojas con 85 °C.

| 85°C | Árbol 1 | Árbol 2 | Árbol 3 |
|-------|---|--|---|
| 5seg |  |  |  |
| 10seg |  |  |  |
| 15seg |  |  |  |
| 20seg |  |  |  |

Tabla 31. Prueba en hojas con 90 °C.

| 90°C | Árbol 1 | Árbol 2 | Árbol 3 |
|-------|---|--|---|
| 5seg |  |  |  |
| 10seg |  |  |  |
| 15seg |  |  |  |
| 20seg |  |  |  |

Anexo B. Pruebas realizadas en hojas con temperaturas de 40 y 50 °C.

Segunda prueba realizadas en hojas.

Tabla 32. Prueba en hojas con 40 °C.

| 40°C | Árbol 1 | Árbol 2 | Árbol 3 |
|-------|--|---|--|
| 5seg |  |  |  |
| 15seg |  |  |  |

Tabla 33. Prueba en hojas con 50 °C.

| 50°C | Árbol 1 | Árbol 2 | Árbol 3 |
|-------|---|--|---|
| 5seg |  |  |  |
| 15seg |  |  |  |

Anexo C. Código base del controlador PID.

```
error = setpoint - temperatureC;  
  
double P = Kp * error;  
integral += Ki * error;  
  
if (integral > integralMax) {  
    integral = integralMax;  
} else if (integral < -integralMax) {  
    integral = -integralMax;  
}  
double D = Kd * (error - previous_error);  
  
double output = P + integral + D;
```

Anexo D. Código de interfaz y lectura puerto serial.

```
variable= (fread(SerialP,30,'uchar'));  
ini=find(variable==73);  
ini=ini(1)+1;  
fin=find(variable==70);  
fin= fin(find(fin>ini))-1;  
fin=fin(1);  
tempC=char(variable(ini:fin))';  
temp=str2num(tempC);  
  
ini=find(variable==67);  
ini=ini(1)+1;  
fin=find(variable==82);  
fin= fin(find(fin>ini))-1;  
fin=fin(1);  
Con1=char(variable(ini:fin))';  
cont=str2num(Con1);  
  
set(txbx(1),'string',tempC);
```

Para saber más acerca de los códigos escribir al correo u20182172596@usco.edu.co