

**Diseño e Implementación de un Sistema de Control de Temperatura para un Biorreactor
Aplicado al Proceso de Fermentación de Cacao mediante una Interfaz IoT**

Daiver Stuard Rangel Escobar

Asesor

Msc. Alexander Flórez Martínez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería (ECBTI)

Ingeniería Electrónica

2025

Resumen

El desarrollo del proyecto tiene como finalidad la implementación de un sistema de control de temperatura aplicado a biorreactor de tipo rotatorio para fermentación de granos de cacao por medio de tecnologías IoT (El internet de las cosas); el desarrollo consiste en controlar la temperatura de un biorreactor encargado de homogenizar los granos de cacao durante el proceso postcosecha en la etapa de fermentación.

Debido a que el proceso de control de temperatura durante la fermentación del cacao se hace manualmente, se desarrollará un control automático por medio de tarjetas de control y sensores de temperatura y sistema térmico actuador, con la cual se mantendrá la temperatura adecuada durante el proceso de fermentación, automáticamente, el agricultor tendrá la facilidad de controlar y supervisar el proceso de fermentación del Cacao de forma remota, lo que ayudará a mejorar la calidad del producto.

Actualmente se desarrolló un proyecto en la universidad UNAD, denominado diseño y ensamble de un Biorreactor Automatizado para el Proceso de Fermentación del Cacao y se desea continuar la investigación diseñando un sistema de control de temperatura para el biorreactor y automatizando el proceso con tecnología IoT, el equipo está ubicado en el laboratorio de la UNAD y se requiere incorporar un sistema térmico que mantenga la temperatura adecuada de la masa de cacao, lo cual favorece la mejora de la calidad del producto final.

Palabras claves: Automatización, control de temperatura, IoT, agroindustria

Abstract

The purpose of the development of the project is the implementation of a temperature control system applied to a rotary-type bioreactor for fermentation of cocoa beans through IoT technologies (The Internet of Things); The development consists of controlling the temperature of a bioreactor responsible for homogenizing the cocoa beans during the post-harvest process in the fermentation stage.

Because the temperature control process during cocoa fermentation is done manually, automatic control will be developed through control cards and temperature sensors and a thermal actuator system, with which the appropriate temperature will be maintained during the production process. fermentation, automatically, the farmer will have the facility to control and supervise the cocoa fermentation process remotely, which will help improve the quality of the product.

Currently, a project was developed at the UNAD university, called design and assembly of an Automated Bioreactor for the Cocoa Fermentation Process and it is desired to continue the research by designing a temperature control system for the bioreactor and automating the process with IoT technology, the The equipment is located in the UNAD laboratory and requires the addition of a thermal system that allows maintaining the temperature of the cocoa mass, which benefits the improvement of product quality

Keywords: Automation, temperature control, IoT, agribusiness

Tabla de Contenido

| | |
|---|----|
| Introducción..... | 10 |
| Justificación..... | 11 |
| Planteamiento del Problema | 13 |
| Metodología..... | 15 |
| Objetivos..... | 17 |
| Objetivo General..... | 17 |
| Objetivos Específicos | 17 |
| Estado del Arte | 18 |
| Marco Teórico..... | 24 |
| Postcosecha del Cacao | 25 |
| Fermentación del Cacao | 25 |
| Secado..... | 29 |
| Tostado..... | 29 |
| Implementación del Hardware | 31 |
| Selección de los Dispositivos Eléctricos y Electrónicos | 33 |
| Implementación del Algoritmo..... | 37 |
| Instalación de Hardware | 43 |
| Pruebas de Funcionamiento Fase 1 | 49 |
| Inicio de Pruebas..... | 51 |

| | |
|---|----|
| Muestras de Cacao Después del Proceso de Fermentación | 52 |
| Pruebas de Funcionamiento Fase 2 | 54 |
| Inicio de las Pruebas | 56 |
| Muestras de cacao Después del Proceso de Fermentación..... | 69 |
| Conclusiones..... | 70 |
| Referencias | 73 |

Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 <i>Características principales del Motorreductor</i> | 33 |
| Tabla 2 <i>Características y Especificaciones de Espduino32</i> | 34 |
| Tabla 3 <i>Características del Sensor NTC 10K</i> | 35 |
| Tabla 4 <i>Características del Módulo Relay de 2 canales</i> | 36 |
| Tabla 5 <i>Características del Módulo Calentador</i> | 36 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 <i>Aspas de Remoción Terminado</i> | 18 |
| Figura 2 <i>Resultado de Pruebas de Temperatura</i> | 19 |
| Figura 3 <i>Resultado del Grano del Cacao Desde su Inicio Hasta su Correcta Fermentación</i> | 20 |
| Figura 4 <i>Fermentador Cilíndrico</i> | 21 |
| Figura 5 <i>Dispositivo de Alertas</i> | 22 |
| Figura 6 <i>Diseño en 3D Fermentador</i> | 23 |
| Figura 7 <i>Etapas de Procesamiento de Cacao</i> | 27 |
| Figura 8 <i>Mapa Mental de la Fermentación</i> | 27 |
| Figura 9 <i>Diagrama de Flujo del Fermentador</i> | 29 |
| Figura 10 <i>Barril en Madera</i> | 31 |
| Figura 11 <i>Control de Temperatura IoT</i> | 32 |
| Figura 12 <i>Diagrama de Conexiones</i> | 32 |
| Figura 13 <i>Motorreductor JGY-370 DC12V 10RPM</i> | 33 |
| Figura 14 <i>Espduino-32</i> | 34 |
| Figura 15 <i>Sensor NTC 10k</i> | 35 |
| Figura 16 <i>Modulo Relay</i> | 35 |
| Figura 17 <i>Calentador Cerámico</i> | 36 |
| Figura 18 <i>Definición de Variables y Blynk</i> | 38 |
| Figura 19 <i>Definición de Variables</i> | 38 |
| Figura 20 <i>Configuración de Pines</i> | 39 |
| Figura 21 <i>Configuración del Void para la Eprom</i> | 40 |
| Figura 22 <i>Configuración del Void Download EPROM</i> | 41 |

| | |
|---|----|
| Figura 23 <i>Configuración del Void loop Principal del proceso de fermentación</i> | 42 |
| Figura 24 <i>Instalación de Celda de Calefacción</i> | 43 |
| Figura 25 <i>Instalación del Motorreductor</i> | 44 |
| Figura 26 <i>Instalación del Controlador IoT</i> | 45 |
| Figura 27 <i>Instalación Final del Sistema</i> | 45 |
| Figura 28 <i>Ingreso a la Web Blynk</i> | 46 |
| Figura 29 <i>Interfaz web del Sistema de Fermentación</i> | 47 |
| Figura 30 <i>App Usuario Final Blynk</i> | 48 |
| Figura 31 <i>Cacao Criollo Seleccionado para la Prueba de Fermentación</i> | 49 |
| Figura 32 <i>Ubicación de la Finca</i> | 50 |
| Figura 33 <i>Frutos de la Mazorca de Cacao</i> | 50 |
| Figura 34 <i>Grano de Cacao Obtenido de las Mazorcas</i> | 51 |
| Figura 35 <i>Aplicación del Proceso de Fermentación</i> | 52 |
| Figura 36 <i>Inicio del proceso de Fermentación</i> | 52 |
| Figura 37 <i>Resultados de la Fermentación</i> | 53 |
| Figura 38 <i>Adecuación de Celda de Calor a los Costados</i> | 54 |
| Figura 39 <i>Adecuación de Poleas Dentadas</i> | 55 |
| Figura 40 <i>Adecuación de Tarjetas de Control</i> | 56 |
| Figura 41 <i>Peso de las Muestras de Cacao</i> | 56 |
| Figura 42 <i>Muestras de Cacao</i> | 57 |
| Figura 43 <i>Verificación de Conexión Wifi</i> | 58 |
| Figura 44 <i>Verificación de Conexión Blynk</i> | 59 |
| Figura 45 <i>Aplicación Web Inicio del Proceso de Fermentación</i> | 61 |

| | |
|--|----|
| Figura 46 <i>Aplicación Android Inicio.</i> | 61 |
| Figura 47 <i>Aplicación Android Control de Temperatura.</i> | 62 |
| Figura 48 <i>Aplicación Android Interfaz Gráfica.</i> | 63 |
| Figura 49 <i>Interfaz Web del Fermentador 10 Horas.</i> | 64 |
| Figura 50 <i>Interfaz Web Fermentador de Cacao 14 Horas.</i> | 65 |
| Figura 51 <i>Interfaz Web Fermentador de Cacao 38 Horas.</i> | 65 |
| Figura 52 <i>Interfaz Web Fermentador de Cacao 66 Horas.</i> | 66 |
| Figura 53 <i>Interfaz Web Fermentador de Cacao 82 Horas.</i> | 67 |
| Figura 54 <i>Interfaz Web Fermentador de Cacao 106 Horas</i> | 68 |
| Figura 55 <i>Interfaz Web Fermentador de Cacao 140 Horas.</i> | 68 |
| Figura 56 <i>Muestras de Cacao Fermentadas</i> | 69 |

Introducción

En la agroindustria del cacao, el proceso de fermentación juega un papel crucial en la calidad final del producto. Sin embargo, el control preciso de la temperatura durante este proceso es fundamental y, en muchos casos, se realiza manualmente, lo que puede llevar a inconsistencias y resultados subóptimos. Con el fin de abordar esta problemática, el presente proyecto de investigación se enfoca en el diseño e implementación de un sistema de control de temperatura automatizado para un biorreactor utilizado en la fermentación de granos de cacao.

El proyecto surge como una continuación del trabajo realizado en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), donde se diseñó y ensambló un Biorreactor Automatizado para el Proceso de Fermentación del Cacao. En esta nueva fase, se busca integrar tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) para facilitar el monitoreo y control remoto del proceso de fermentación, brindando a los agricultores una herramienta efectiva para mejorar la calidad del producto final.

La automatización del control de temperatura se logrará mediante el uso de tarjetas de control, sensores de temperatura, permitiendo mantener la temperatura óptima de la masa de cacao de manera precisa y consistente. Esto no solo optimizará el proceso de fermentación, sino que también brindará una mayor flexibilidad y comodidad al agricultor al permitirle supervisar y ajustar el proceso de forma remota.

Como puntos de enfoque, este proyecto de investigación busca contribuir significativamente al sector cacaotero, promoviendo la adopción de tecnologías innovadoras para mejorar la calidad y eficiencia en la producción de cacao fermentado.

Justificación

La importancia del cacao en la industria alimentaria y la economía de muchos países productores es innegable. Sin embargo, la calidad del cacao fermentado, determinada en gran medida por el proceso de fermentación, es fundamental para su valor comercial y su aceptación en los mercados internacionales. En este contexto, el control preciso de la temperatura durante la fermentación es un factor crítico que influye directamente en la calidad del producto final.

Actualmente, muchos agricultores enfrentan desafíos para mantener una temperatura constante y óptima durante el proceso de fermentación del cacao, lo que puede resultar en una calidad inconsistente y en una pérdida en la producción al no alcanzar la temperatura adecuada para la fermentación del cacao. La falta de control automatizado de la temperatura contribuye a esta problemática, ya que los métodos manuales pueden ser imprecisos y difíciles de mantener, especialmente en entornos donde las condiciones ambientales son variables.

El uso de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) y la automatización del control de temperatura ofrecen una solución efectiva a estos desafíos. Al implementar un sistema automatizado de control de temperatura en el biorreactor utilizado para la fermentación del cacao, se garantiza una temperatura óptima y constante durante todo el proceso. Esto no solo mejora la calidad del cacao fermentado, sino que también aumenta la eficiencia del proceso y reduce el riesgo de pérdidas económicas para los agricultores.

Además, la posibilidad de monitorear y controlar el proceso de fermentación de forma remota a través de tecnologías IoT brinda una mayor flexibilidad y comodidad para los agricultores, permitiéndoles optimizar sus operaciones y tomar decisiones informadas en tiempo real.

En este contexto, el presente proyecto de investigación justifica su relevancia al abordar una necesidad crítica en la industria cacaotera mediante la aplicación de tecnologías innovadoras. La implementación de un sistema automatizado de control de temperatura para el biorreactor de fermentación del cacao no solo beneficia a los agricultores al mejorar la calidad y eficiencia de su producción, sino que también contribuye al desarrollo sostenible y la competitividad del sector agroindustrial a nivel local e internacional.

Planteamiento del Problema

En la industria del cacao, el proceso de fermentación juega un papel crucial en la calidad y el valor final del producto. La fermentación adecuada de los granos de cacao no solo influye en su sabor y aroma, sino que también afecta su textura y características físicas, lo que determina su aceptación en los mercados internacionales y su valor comercial. Uno de los factores críticos que influyen en el proceso de fermentación es el control preciso de la temperatura.

Actualmente, en muchas regiones productoras de cacao, el control de la temperatura durante la fermentación se realiza de manera manual o no se controla de manera adecuada. Esto puede deberse a la falta de tecnologías adecuadas, recursos limitados o conocimientos técnicos insuficientes por parte de los agricultores. Como resultado, se pueden experimentar fluctuaciones significativas en la temperatura durante el proceso de fermentación, lo que conlleva a una calidad inconsistente del cacao fermentado.

La falta de control automatizado de la temperatura durante la fermentación del cacao representa un problema que impacta negativamente en varios aspectos:

Calidad del producto: Las variaciones en la temperatura durante la fermentación pueden afectar negativamente la calidad del cacao fermentado, resultando en sabores indeseados, texturas irregulares y aromas no deseables, lo que reduce su valor comercial y su competitividad en el mercado.

Eficiencia del proceso: La falta de control automatizado de la temperatura puede llevar a una gestión ineficiente del tiempo y los recursos durante el proceso de fermentación. La necesidad de monitorear y ajustar manualmente la temperatura requiere una dedicación de tiempo y esfuerzo por parte de los agricultores, lo que puede limitar la capacidad de procesar grandes volúmenes de cacao de manera consistente y eficiente.

Competitividad del sector: En un mercado globalizado y altamente competitivo, la calidad y consistencia del cacao fermentado son factores críticos para la competitividad de los productores en el mercado internacional. La falta de control automatizado de la temperatura puede poner en desventaja a los productores frente a competidores que utilizan tecnologías más avanzadas y eficientes en sus procesos de producción.

Ante este escenario, surge la necesidad de desarrollar e implementar un sistema de control de temperatura automatizado para el biorreactor utilizado en la fermentación del cacao. Este sistema deberá integrar tecnologías IoT y sistemas de control térmico para garantizar una temperatura óptima y constante durante todo el proceso de fermentación, contribuyendo así a mejorar la calidad del cacao fermentado, aumentar la eficiencia del proceso y fortalecer la competitividad del sector cacaotero a nivel local e internacional.

Metodología

El desarrollo e implementación del sistema de control de temperatura automatizado para el biorreactor utilizado en la fermentación del cacao se llevará a cabo siguiendo un enfoque metodológico que abarque las siguientes etapas:

Fase 1: Revisión bibliográfica: Se realizará una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica relacionada con el proceso de fermentación del cacao, el control de temperatura, las tecnologías IoT aplicadas a la agroindustria y los sistemas de automatización. Esta revisión servirá de base teórica para fundamentar el diseño y desarrollo del sistema propuesto.

Fase 2: Diseño del sistema: Con base en los conocimientos adquiridos en la revisión bibliográfica, se procederá al diseño detallado del sistema de control de temperatura automatizado. Esto incluirá la selección de los componentes necesarios, como sensores de temperatura, actuadores térmicos, tarjetas de control y dispositivos de conectividad IoT.

Fase 3: Desarrollo del software: Se desarrollará el software necesario para la programación y control del sistema automatizado. Esto incluirá la programación de algoritmos de control, interfaces de usuario para monitoreo remoto y el sistema de temperatura fuera en los rangos establecidos.

Fase 4: Implementación del hardware: Se procederá a la instalación y configuración de los componentes hardware del sistema, incluyendo sensores de temperatura, actuadores térmicos y dispositivos de conectividad IoT. Se llevarán a cabo pruebas preliminares para verificar el funcionamiento adecuado de cada componente.

Fase 5: Integración y pruebas del sistema: Una vez que todos los componentes hardware y software estén implementados, se procederá a integrar el sistema en el biorreactor utilizado en

la fermentación del cacao. Se realizarán pruebas exhaustivas para asegurar que el sistema cumpla con los requisitos de control de temperatura y funcione de manera confiable y consistente.

Fase 6: Optimización y ajustes: Se realizarán ajustes y optimizaciones en el sistema en función de los resultados obtenidos durante las pruebas. Esto puede incluir la calibración de sensores, la optimización de algoritmos de control y la mejora de la interfaz de usuario para facilitar su uso por parte de los agricultores.

Validación del sistema: Una vez que el sistema haya sido optimizado y ajustado, se procederá a su validación en condiciones reales de operación. Se llevarán a cabo pruebas de campo en colaboración con agricultores locales para evaluar la eficacia y utilidad del sistema en situaciones reales de producción.

Documentación y difusión de resultados: Finalmente, se elaborará un informe técnico detallado que documente el diseño, desarrollo e implementación del sistema de control de temperatura automatizado. Los resultados obtenidos durante el proceso de validación serán difundidos a través de publicaciones científicas, presentaciones en conferencias y talleres técnicos, con el objetivo de compartir conocimientos y experiencias con la comunidad científica y el sector agroindustrial.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un control de temperatura para un biorreactor aplicado proceso de fermentación de cacao implementando tecnología IoT

Objetivos Específicos

Diseñar el control de temperatura aplicado al proceso de fermentación del cacao del biorreactor por medio de nuevas tecnologías como la IoT (El internet de las cosas).

Implementar una interfaz gráfica por medio tecnologías IoT para la supervisión y control de temperatura en la fermentación del cacao

Operar el sistema de control de forma automática en los tiempos de producción establecidos mejorando las condiciones de fermentación evitando perdidas en la producción

Estado del Arte

Figueroa, J, L (2023) Figura 1, Según el diseño y ensamble de un biorreactor automatizado en el proceso de fermentación parten de la necesidad de conservar y lograr un aumento de la temperatura durante el proceso de fermentación, es la madera quién por acción natural no permite que la temperatura de las almendras baje considerablemente de noche y por ende se afecte la fermentación.

Figura 1

Aspas de Remoción Terminado.



Nota. Diseño de las Aspas del Biorreactor Figueroa, J, L (2023).

Para lograr la automatización Figueroa utilizo el software de Arduino, una plataforma gratuita que permite descargar el entorno de Arduino IDE, para crear los comandos e instrucciones en lenguaje de programación que permite interactuar con los circuitos para obtener los datos en tiempo real donde utilizó los sensores de temperatura DS18B20 obteniendo los valores en tiempo real.

En el marco teórico sobre el control de temperatura en la fermentación del cacao, se menciona que es fundamental conocer las temperaturas adecuadas para obtener un cacao de alta

calidad. Según la investigación realizada por Rivera et al. en 2012, del tipo y tiempo de fermentación del cacao la etapa de fermentación del cacao es una etapa muy importante en el procesamiento del grano, ya que se producen cambios bioquímicos que dan origen a los precursores del aroma y sabor

Durante la investigación Balkhaya, Balkhaya & Ilham,. (2020). Obtuvieron resultados positivos en la integración del dispositivo por medio de Arduino al automatizar el proceso de fermentación de cacao con el sensor LM35 el cual era el encargado de leer la temperatura en tiempo real del cacao. El dispositivo de fermentación ayudo a facilitar el trabajo de los productores de cacao a continuación se detalla en la figura 2 las temperaturas obtenidas durante el proceso de fermentación.

Figura 2

Resultado de Pruebas de Temperatura.

| Results of temperature testing without load on cocoa beans | | |
|--|------|-------------------|
| Testing | Time | Temperature |
| 1 | 4 | 30 ⁰ C |
| 2 | 8 | 35 ⁰ C |
| 3 | 12 | 39 ⁰ C |
| 4 | 20 | 32 ⁰ C |
| 5 | 24 | 41 ⁰ C |
| 6 | 28 | 49 ⁰ C |
| 7 | 32 | 45 ⁰ C |

Nota. Obtención de Resultados de la Temperatura en Diferentes Tiempos Balkhaya, Balkhaya & Ilham(2020).

El propósito el cual los llevó a realizar esta herramienta de investigación fue la de crear una herramienta que pueda ayudar a aliviar el trabajo de los productores de cacao en la agitación de los granos de cacao actividad que fue controlada por medio Arduino.

Carrillo Castellanos, J. J. (2022). Realizo un fermentador de cacao en la universidad del bosque con el fin de evaluar su rendimiento en un ambiente controlado, después del procedimiento realizado lograron mantener los parámetros establecidos como humedad y temperatura durante un tiempo de fermentación de 96 horas con una temperatura inicial de 25° aumentando gradualmente hasta los 50 °C con una remoción o agitación del cacao durante 20 minutos cada 12 horas, los logros obtenidos fueron satisfactorio en los granos de cacao siendo capaz de controlar la temperatura durante todo el proceso utilizando un proceso retroalimentado de información en la figura 3 se evidencia los resultados de Carrillo.

Figura 3

Resultado del Grano del Cacao Desde su Inicio Hasta su Correcta Fermentación.



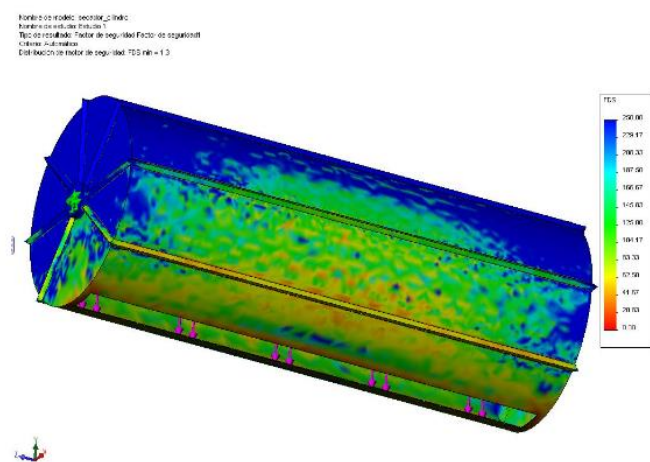
Nota. Muestras de Cacao Carrillo Castellanos, J. J. (2022).

Guzmán Farfán, L., Castro Sánchez, M., Cruz Alcedo, G., & Arbulú Zuazo, A. (2021). Diseño de un fermentador cilíndrico automatizado para la fermentación de cacao criollo piurano. Lograron la ejecución de las funciones de remoción programadas y una disminución en el

proceso de fermentación respecto a lo acostumbrado, durante las pruebas de fermentación duraron alrededor de 96 horas (4 días) logrando una disminución del proceso artesanal que normalmente dura de 6 a 7 días, el fermentador cilíndrico tiene muy buenas prestaciones en la fermentación del cacao debido a que permite la remoción del producto sin tener que sacarlo del contenedor por lo q no se produce una disminución considerable de temperatura lo que hace que disminuya el tiempo de fermentación en la figura 4 observamos el mapa de calor del cilindro.

Figura 4

Fermentador Cilindrico.



Nota. Mapa de Temperatura del Cilindro Guzmán Farfán, L., Castro Sánchez, M., Cruz Alcedo, G., & Arbulú Zuazo, A. (2021).

Parra Portillo, S., & Doval Sanchez, J. C. (2023). Alerta Inteligente Con Arquitectura IoT Para El Seguimiento Y Monitoreo De La Fermentación Del Cacao, ñ lograron integrar de manera inteligente el monitoreo para la fermentación del cacao por medio de tecnología (IoT) y la utilización de tarjeta de control Raspberry Pi mejorando la eficiencia y calidad en la producción del cacao esta tecnología permitió el monitoreo en tiempo real de las diferentes variables el

proyecto implemento un sistema en la generación de alertas durante el proceso de fermentación llevando a alertar tempranamente y evitando la pérdida de producción de los pequeños agricultores en la figura 5 observamos el dispositivo de alerta temprana.

Figura 5

Dispositivo de Alertas.



Nota. Control de Alertas Parra Portillo, S., & Doval Sanchez, J. C. (2023).

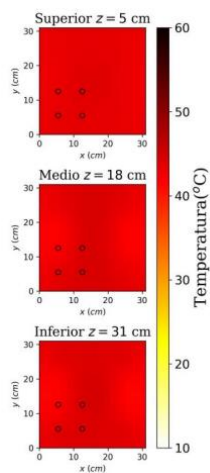
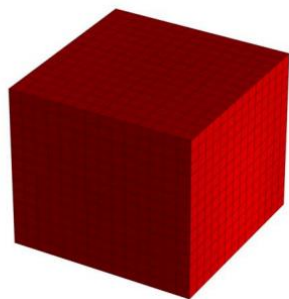
Tovar Perilla, S desarrollaron un sistema electrónico de fermentación de cacao donde el sistema que desarrollaron tiene varias ventajas como el acoplamiento en 3 niveles diferentes dándole un plus de censar 3 niveles de fermentación al tiempo realizando un sistema de encaminamiento por el fermentador con sondas de temperatura y humedad integrando un monitor de visualización para operar la plataforma de forma remota con un valor agregado el cual es poder visualizar una figura 3D sobre la temperatura interna del proceso de fermentación obteniendo la información de la capa superior y la capa inferior del cajón, mostrando que la temperatura no es completamente uniforme porque en sus posiciones laterales presenta una

menor temperatura en comparación con su parte central y en sus extremos implementaron una tarjeta de control Raspberry Pi, una cámara térmica conectada mediante comunicación I2C a la Raspberry Pi y así lograron obtener la temperatura, el sistema está diseñado para brindarle al usuario interacción e información en tiempo real desarrollando por medio Python con una interfaz gráfica como se observa en la figura 6.

Figura 6

Diseño en 3D Fermentador.

Perfil 3D fermentador 1 en tiempo:
2022-11-25 16:44:12



Nota. Vistas en 3D del Fermentador en Tiempo Uno Tovar Perilla, S.

Marco Teórico

Proceso de fermentación del cacao: La fermentación del cacao es una etapa crítica en su procesamiento, ya que durante este proceso se producen cambios bioquímicos fundamentales que influyen en las características organolépticas del producto final. Como señala Guzman (2021), "la fermentación es una etapa crucial en el procesamiento del cacao, durante la cual se desarrollan los precursores de los atributos sensoriales del chocolate, como el sabor y el aroma."

Importancia del control de temperatura: Controlar la temperatura de manera precisa durante la fermentación del cacao es esencial para garantizar la actividad óptima de las enzimas y microorganismos involucrados en el proceso. Según Guzman (2021), "el control preciso de la temperatura durante la fermentación del cacao es esencial para garantizar la actividad enzimática y microbiana óptima, lo que contribuye a la calidad y características finales del producto."

Tecnologías IoT aplicadas a la agroindustria: Las tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) ofrecen un potencial significativo para mejorar la eficiencia y la productividad en la agricultura. Thilakarathne (2021) destacan que "las tecnologías IoT ofrecen un potencial significativo para mejorar la eficiencia y la productividad en la agricultura, permitiendo la monitorización remota y el control automatizado de diversos procesos, incluyendo la fermentación del cacao."

Sistemas de control y automatización: Los sistemas de control y automatización, especialmente aquellos basados en controladores PID, han demostrado ser efectivos en el mantenimiento de la temperatura durante procesos de fermentación. De acuerdo con Canduela (2022), "los sistemas de control y automatización basados en controladores PID han demostrado ser efectivos en el mantenimiento de la temperatura durante procesos de fermentación, proporcionando una precisión y estabilidad óptimas."

Desarrollos específicos para la industria del cacao: La implementación de sistemas automatizados de control de temperatura ha demostrado mejorar la calidad y uniformidad del cacao fermentado. Según Llerena (s/f), "la implementación de sistemas automatizados de control de temperatura ha demostrado mejorar la calidad y uniformidad del cacao fermentado, reduciendo la variabilidad y aumentando la eficiencia del proceso."

Plataformas y herramientas para el control de procesos agroindustriales: Plataformas de software específicas para la gestión de procesos agroindustriales, integradas con tecnologías IoT, ofrecen una solución completa para el control y monitorización de la fermentación del cacao. Según Tovar. (2021) señalan que "plataformas de software específicas para la gestión de procesos agroindustriales, integradas con tecnologías IoT, ofrecen una solución completa para el control y monitorización de la fermentación del cacao, facilitando la toma de decisiones y optimizando los recursos."

Postcosecha del Cacao

La postcosecha juega un papel fundamental en la transformación del cacao es aquí donde se desarrollan sus sabores característicos que distinguen el cacao de alta calidad se caracteriza por ser una de las etapas de mayor cambio al modificar sus condiciones físicas Leal et al., (2008), químicas y organolépticas comprendiendo las etapas que le terminan de aportar todo su sabor característico como la fermentación, secado y tostado.

Fermentación del Cacao

El proceso de fermentación del cacao Educa.co (2024) es una fase crítica en su procesamiento, donde los granos de cacao desgranados se colocan en cajones de madera para iniciar una serie de reacciones bioquímicas, mediadas por microorganismos, que resultan en la degradación del mucílago azucarado, la muerte del embrión y la formación de compuestos

precursores de aroma. Las levaduras iniciales consumen oxígeno, creando un ambiente anaerobio que favorece la acción de bacterias lácticas, produciendo ácido láctico. Posteriormente, el volteo de los granos permite la entrada de aire, reiniciando el proceso de fermentación aeróbica y favoreciendo el desarrollo de bacterias acéticas. Este proceso genera calor, aumentando la temperatura y activando enzimas que catalizan diversas reacciones, como la transformación de sacarosa en glucosa y fructuosa, la degradación de proteínas en péptidos y aminoácidos, y la oxidación de polifenoles. La fermentación puede durar de 4 a 6 días, dependiendo de la variedad de cacao, y una fermentación adecuada es crucial para disminuir el sabor amargo y la astringencia de los granos, así como para desarrollar los precursores de aroma que influyen en la calidad del chocolate. El tamaño y las condiciones de los fermentadores de madera deben ser adecuados para garantizar un proceso de fermentación óptimo.

Durante la fermentación del cacao, el pH ácido (entre 3 y 4) y las altas temperaturas (entre 40 y 50 °C) son fundamentales para evitar la germinación del embrión y descomponer las paredes celulares. Es crucial verificar la temperatura de los granos de forma uniforme en todo el proceso, ya que el aumento de temperatura activa enzimas que catalizan diversas reacciones. Estas reacciones incluyen la transformación de sacarosa en glucosa y fructuosa, la degradación de proteínas en péptidos y aminoácidos, y la oxidación de polifenoles, lo que produce el característico color marrón durante la fermentación. La duración del proceso varía entre 4 y 6 días, dependiendo de la variedad de cacao. Una sobre fermentación, que ocurre si los granos fermentan por más de 7 días, puede generar otros microorganismos que producen compuestos responsables de mal sabor y aroma, disminuyendo así la calidad del cacao en la figura 7

Observamos las etapas del proceso del cacao.

Figura 7

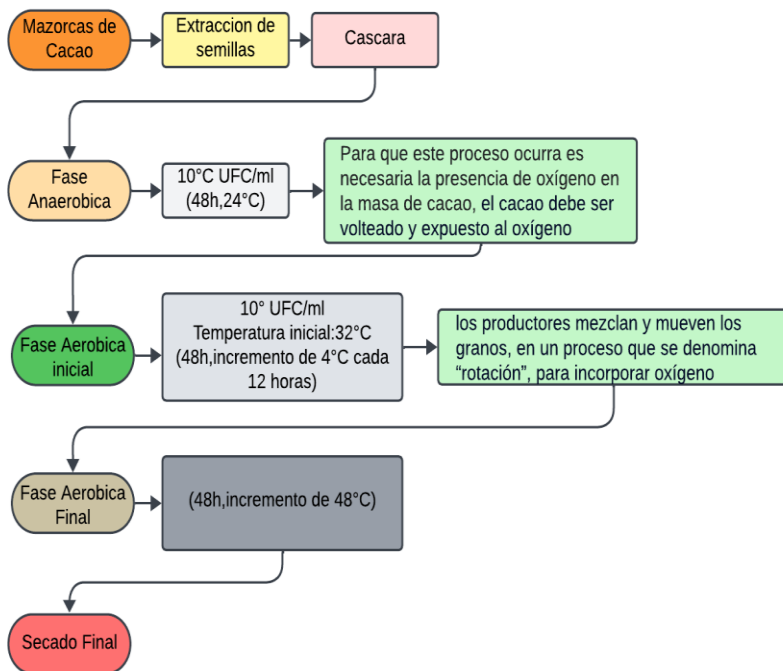
Etapas de Procesamiento de Cacao.



Nota. Diagrama de Flujo de la Producción de Cacao Educa.co (2024).

Figura 8

Mapa Mental de la Fermentación.



Nota. (Mapa mental, Descripción del Proceso de Fermentación).

La fermentación del cacao es un proceso crucial en la elaboración del chocolate, ya que impacta significativamente en el sabor, aroma y calidad final del producto. Durante este proceso, se producen una serie de reacciones bioquímicas complejas que transforman los compuestos químicos presentes en el grano fresco de cacao. Esto da lugar a la formación de precursores del sabor y aroma, la reducción de la astringencia y amargor, el desarrollo del color, la eliminación de la pulpa y la muerte del embrión.

El control de la temperatura durante la fermentación es fundamental para obtener un cacao de alta calidad.

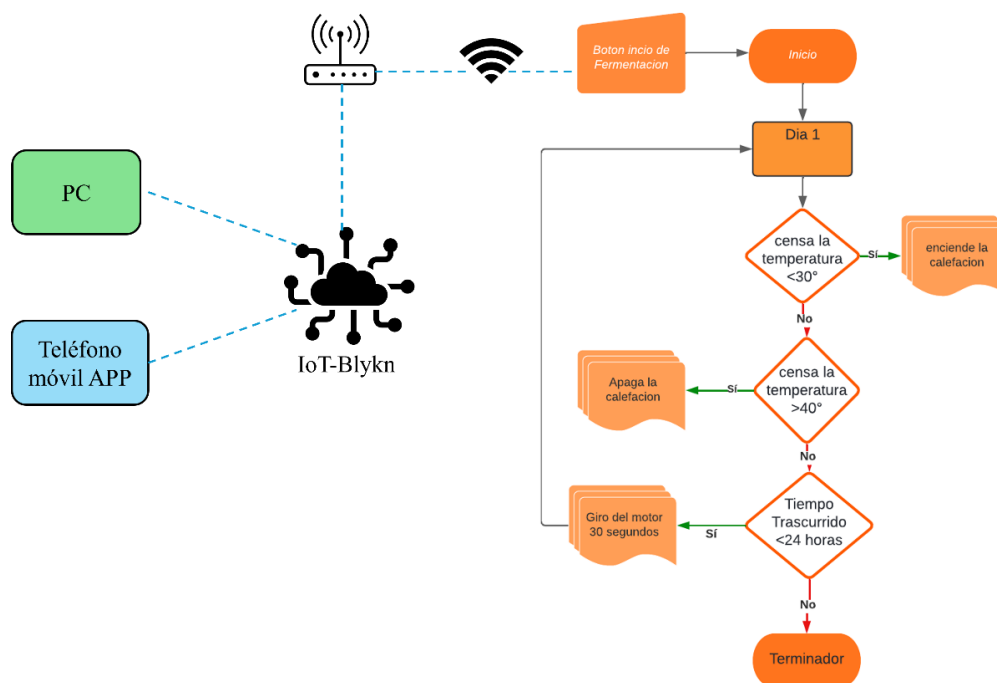
Las temperaturas demasiado bajas: pueden ralentizar o detener el proceso de fermentación, resultando en un cacao con un sabor ácido y poco desarrollado.

Temperaturas demasiado altas: pueden provocar, la sobre fermentación del cacao, lo que da lugar a un sabor amargo y astringente.

Es de crucial importancia mantener una temperatura adecuada y controlada para así poder asegurar un perfil de sabor y aroma óptimo en el chocolate final en la figura 9 podemos observar el diagrama de flujo del control para el fermentador y sus acciones a ejecutar dando como ejemplo el día 1 de fermentación, estas acciones serán replicadas en los siguientes seis días de fermentación.

Figura 9

Diagrama de Flujo del Fermentador.



Nota. Controles y Acciones del Control de Temperatura.

Secado

El proceso de secados de los granos de cacao se lleva a cabo hasta que la humedad se reduce del 60% al 7 % en el grano lo cual permite reacciones bioquímicas en el cacao, durante esta fase ocurre la degradación de polifenoles y del ácido acético, (Bach,2022) permitiendo el desarrollo de los nuevos componentes de sabor y a la pérdida de integridad de la membrana formando su color marrón característico durante el proceso de secado los azúcares reductores participan en reacciones de pardeamiento conocidos como reacciones de Maillard.

Tostado

En el proceso de tostado del cacao existen varios métodos como en sartén horno o tambor rotatorio, cada uno imparte características una al chocolate, durante el proceso de tostado se

busca elevar la temperatura de cacao lo que le garantiza las propiedades aromáticas y el sabor del chocolate, los tiempos de temperatura del proceso realizándose en muestras de 500 g y una temperatura de 120 a 140 °C que es el rango comúnmente encontrado en la industria. Una vez se realice el proceso del tostado las almendras se dejan enfriar antes de quitar las cascarillas y posteriormente se procede a triturarlas de forma mecánica todas las almendras del cacao.

Implementación del Hardware

Abordando toda la información relacionada con el cacao y los diferentes métodos de control de temperatura utilizados por los agricultores, se implementará un sistema de control de temperatura en un biorreactor. El objetivo es mantener la temperatura óptima durante todo el proceso de fermentación. La madera se utilizará como material aislante debido a sus excelentes propiedades, minimizando la pérdida de calor durante la fermentación.

Este hardware se implementará en un prototipo de barril diseñado por Figueroa, J.L. (2023). El barril tiene dimensiones externas de 30 cm de largo y 22 cm de diámetro, y cuenta con una tapa que se abre a 180°, lo que permite llenar y extraer las almendras de manera eficiente durante el proceso de fermentación, figura 10.

El uso de este barril prototipo, combinado con el sistema de control de temperatura, asegurará que las condiciones sean óptimas para la fermentación del cacao, mejorando así la calidad del producto final.

Figura 10

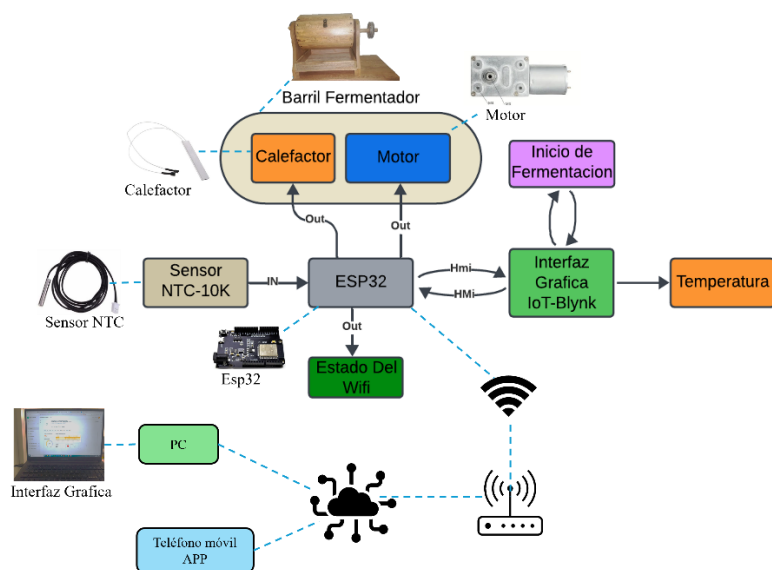
Barril en Madera.



Nota. Barril Biorreactor Figueroa, J, L (2023).

Figura 11

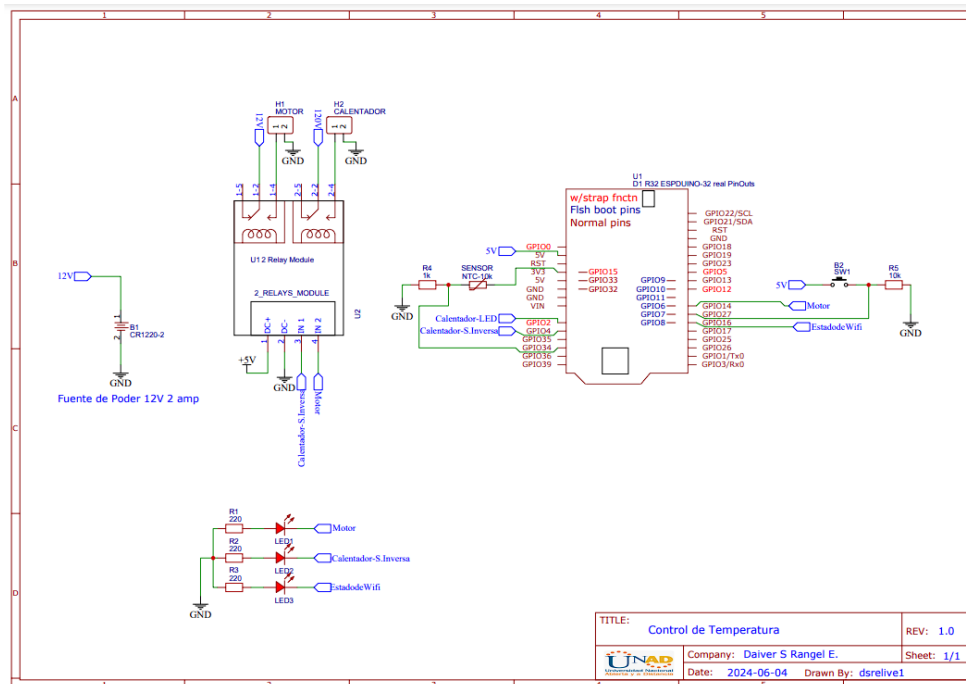
Control de Temperatura IoT.



Nota. Sistema de Control del Fermentador IoT.

Figura 12

Diagrama de Conexiones.

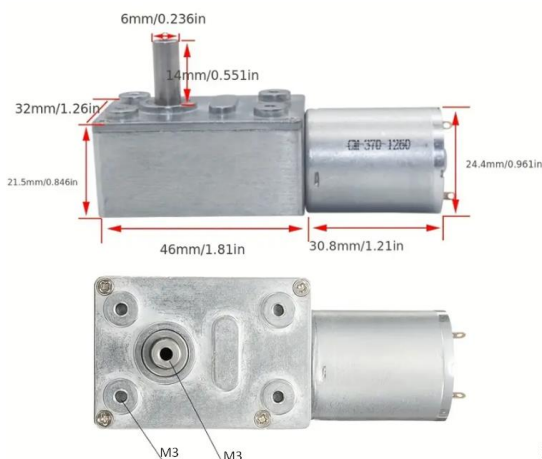


Nota. Plano Eléctrico de Conexiones del Fermentador de Cacao.

Selección de los Dispositivos Eléctricos y Electrónicos

Figura 13

Motorreductor JGY-370 DC12V 10RPM.



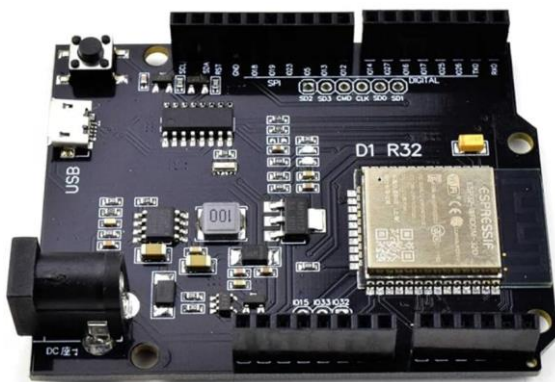
Nota. Motorreductor de 12 Voltios (JGY370-10 12VDC 90 degrees High torque metal geared DC motors.).

Tabla 1

Características principales del Motorreductor.

| Característica | Descripción |
|--------------------------------|--|
| Voltaje nominal | 12V |
| Velocidad Sin carga | 10 RPM (revoluciones por minuto) |
| Par (torque) Temperatura | Alta capacidad de par, ideal para aplicaciones que requieren fuerza significativa a bajas velocidades. |
| Consumo de corriente sin carga | Aproximadamente 0.5 A |
| Consumo de corriente sin carga | Aproximadamente 2.5 A |
| Reductor de engranajes | Engranajes de metal para mayor durabilidad y eficiencia. |
| Eje de Salida | Diámetro 6mm |
| Potencia Máxima | 3 watts |

Nota. Adaptado de Datashett (Communica.co.za).

Figura 14*Espduino-32.*

Nota. Tarjeta de control (*ESPDUINO-32 - Geekworm Wiki, s. f.*).

Tabla 2*Características y Especificaciones de Espduino32.*

| Característica | Descripción |
|----------------------|--|
| Chip | Esp32 dual-core de 240 MHz |
| Conectividad | Wi-fi 802.11 b/g/n - Bluetooth |
| Memoria | 4 Mb de memoria Flash |
| pins | 34 pines GPIO, configurables para diversas funciones |
| ADC | 18 canales ADC de 12 bits |
| Interfaces | SPI, I2C, I2S, UART, PWM |
| Voltaje de operación | 3.3V (con regulador integrado que permite alimentación de 5V a través del puerto USB) |
| Compatibilidad | Compatible con el entorno de desarrollo Arduino IDE y otros entornos como PlatformIO y Espressif IDF (IoT Development Framework) |

Nota. Adaptado de datashett (Espressif.com).

Figura 15

Sensor NTC 10k.



Nota. Sensor de Temperatura NTC (*Termistor Sensor De Temperatura Ntc 10k, s. f.-b*).

Tabla 3

Características del Sensor NTC 10K.

| Característica | Descripción |
|--------------------|--|
| Material | Envoltura de acero inoxidable y a prueba de agua |
| Temperatura | Rango de medición: -40 a 120°C |
| Largo del cable | 60cm |
| Tamaño de la sonda | 5 x 25mm |
| Termistor | 10K |
| Voltaje Input | 3.0-5.5V input voltaje |

Nota. Adaptado de datashett (*Termistor Sensor De Temperatura Ntc 10k, s. f.-b*)

Figura 16

Modulo Relay.



Nota. Modulo Relay de Dos Canales (*Modulo Relé de 2 Canales, s. f.*).

Tabla 4*Características del Módulo Relay de 2 canales.*

| Característica | Descripción |
|------------------------|------------------------|
| Voltaje | 5V |
| Alimentación | 24V |
| Corriente de Operación | 10 Amp |
| Consumo de Corriente | 20 mA |
| Pines | 12 |
| Voltaje Input | 3.0-5.5V input voltaje |
| Diodo de Protección | En cada Bobina |

*Nota: Adaptado de Datasheet (Módulo Relay 2CH 5VDC, s. f.).***Figura 17***Calentador Cerámico.**Nota. Celda Cerámica de Calor de Voltaje AC (Calentador 2ss201380).***Tabla 5***Características del Módulo Calentador*

| Característica | Descripción |
|----------------------|------------------------------|
| Voltaje | 120V |
| Material | Metal |
| Tamaño | 11,2x2 cm/4,41x0,79 pulgadas |
| Consumo de Corriente | 20 mA |

Nota. Adaptado de (Calentador 2ss201380)

Implementación del Algoritmo

Para la implementación del algoritmo de control de temperatura, utilizaremos el software de Arduino, una plataforma gratuita que permite crear diversas estructuras de control en el entorno del IDE de Arduino. Este entorno de desarrollo facilita la escritura y carga de código en microcontroladores, permitiéndonos diseñar y ejecutar instrucciones de control específicas para gestionar la temperatura durante la fermentación.

Además, integraremos la tecnología IoT utilizando Blynk, un software libre que permite la conexión remota del sistema a la web. Blynk nos proporciona una interfaz intuitiva para monitorear y controlar el proceso de fermentación desde cualquier parte del mundo, mejorando significativamente la estabilidad y el control de este. A través de Blynk, podremos visualizar en tiempo real los datos de temperatura y ajustar los parámetros de control según sea necesario, garantizando un proceso de fermentación más eficiente y preciso.

Inicialmente, definimos el ID, el nombre y la contraseña del token generado por Blynk. Seguidamente, declaramos cada una de las variables necesarias para el proceso de fermentación. Luego, especificamos el SSID y la contraseña de la red Wifi a la que se conectará el controlador ESP32 figura 18.

A continuación, configuramos cada uno de los puertos que se utilizarán en la implementación del control de temperatura para el fermentador.

Figura 18

Definición de Variables y Blynk.

```
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMC2B7gE8yMk"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "CONTROL DE TEMPERATURA"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "yLVFLHdt_g9537cqeD35tvsKA07F3070"

#include <WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <math.h>
#include <EEPROM.h>

char auth[] = "yLVFLHdt_g9537cqeD35tvsKA07F3070"; // token de autenticación Blynk
const char* ssid = "home1";
const char* pass = "home123456";

#define NTC_PIN 34 // Pin analógico al que está conectado el sensor NTC
#define HEATER_PIN 2 // Define el pin para controlar la calefacción
#define MOTOR_PIN 14 // Define el pin para controlar el motor
#define BUTTON_PIN 17 // Pin del botón físico Eprom
#define LED_PIN 25 // Pin del LED Wifi
#define HEATER_INV_PIN 4 // Pin para la señal inversa del calentador
```

Nota. Iniciamos Definiendo el Nombre y el Id para la Conexión con Blynk.

En la figura 19, definimos las variables que se utilizarán en el código, tales como las variables de tiempo, el encendido del motor, el intervalo de tiempo de 24 horas, el intervalo de almacenamiento en la EPROM, la duración del encendido del motor en milisegundos, y las constantes del sensor NTC de 10K.

Figura 19

Definición de Variables.

```
unsigned long previousMillis = 0; // Variable para almacenar el tiempo anterior
const long interval = 86400000; // Intervalo de 24 horas en milisegundos
const int motorDuration = 1200000; // Duración de la activación del motor en milisegundos

bool processInitialized = false; // Variable para indicar si el proceso ha sido inicializado

int dayCounter = 0; // Contador de días

const long eepromInterval = 300000; // Intervalo de 5 minutos en milisegundos
unsigned long lastEepromMillis = 0; // Tiempo de la última escritura en EEPROM

float thermistor(int rawValue) {
    float resistance;
    float temperature;

    // Constantes específicas del NTC (pueden variar según el modelo del sensor)
    const float BETA = 3950; // Valor BETA del termistor
    const float R0 = 10000; // Resistencia del termistor a 25 grados C (10k ohms)
    const float T0 = 298.15; // Temperatura en Kelvin a 25 grados C (273.15 + 25)
```

Nota. Definimos las Variables de Tiempo y de Almacenamiento y del Sensor NTC.

En el void setup, configuramos cada uno de los pines que vamos a utilizar, ya sea como salidas o entradas, y aseguramos que los pines estén inicialmente en ON u OFF, dependiendo de cómo esté definido cada uno. Inicializamos la comunicación serial con Serial.begin(115200) para poder visualizar la temperatura y el estado de la conexión Wifi.

Si la conexión Wifi es correcta, encendemos un LED llamado Led_Pin, que corresponde físicamente a un LED verde, lo cual nos permite observar que la conexión del ESP32 con el Wifi ha sido exitosa. Finalmente, inicializamos la EEPROM con un tamaño de 512 bytes ver figura 20.

Figura 20

Configuración de Pines.

```
void setup() {
  pinMode(HEATER_PIN, OUTPUT); // Configura el pin del calentador como salida
  digitalWrite(HEATER_PIN, LOW); // Asegura que la calefacción está apagada al iniciar
  pinMode(HEATER_INV_PIN, OUTPUT); // Configura el pin de la señal inversa como salida
  digitalWrite(HEATER_INV_PIN, HIGH); // Asegura que la señal inversa está en HIGH al iniciar
  pinMode(MOTOR_PIN, OUTPUT); // Configura el pin del motor como salida
  digitalWrite(MOTOR_PIN, HIGH); // Asegura que el motor está apagado al iniciar
  pinMode(BUTTON_PIN, INPUT); // Configura el pin del botón como entrada
  pinMode(LED_PIN, OUTPUT); // Configura el pin del LED como salida

  Serial.begin(115200);
  Blynk.begin(auth, ssid, pass);

  Serial.println("WiFi conectado");
  Serial.print("Dirección IP: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());

  digitalWrite(LED_PIN, HIGH); // Enciende el LED Verde cuando se conecta al Wifi

  EEPROM.begin(512); // Inicializa el tamaño del EEPROM
}
```

Nota. Configuramos Cada uno de los Estados de los Pines de Entrada y Salida.

Se configuran las funciones void que realizarán el almacenamiento de la información en la EEPROM. Estas funciones guardarán los intervalos de tiempo, los días y las temperaturas registradas cada 5 minutos durante el proceso de fermentación como se observa en la figura 21.

Figura 21

Configuración del Void para la Eprom.

```

void storeInEEPROM(int address, float value) {
    byte* p = (byte*)(void*)&value;
    for (int i = 0; i < sizeof(value); i++) {
        EEPROM.write(address + i, p[i]);
    }
    EEPROM.commit();
}

float readFromEEPROM(int address) {
    float value = 0.0;
    byte* p = (byte*)(void*)&value;
    for (int i = 0; i < sizeof(value); i++) {
        p[i] = EEPROM.read(address + i);
    }
    return value;
}

void storeTemperatureInEEPROM() {
    int address = 8; // Dirección inicial para almacenar temperaturas
    for (int i = 0; i < 4; i++) {
        float temperature = readFromEEPROM(address);
        storeInEEPROM(address, temperature);
        address += sizeof(float); // Incrementa la dirección en el tamaño de float
    }
}

```

Nota. Estructura del Void para la Lectura y Escritura de la EPROM.

En la configuración de la función void Download EPROM figura 22, se realiza la descarga de los archivos almacenados al finalizar el proceso de fermentación. Además, se implementa la función del botón, el cual inicializa el proceso de fermentación y borra la información de la EPROM al comenzar un nuevo proceso. También se inicializa el contador de días y el temporizador, que indican el tiempo transcurrido del proceso de fermentación.

Figura 22

Configuración del Void Download EPROM.

```

BLYNK_WRITE(V5) {
  int buttonState = param.asInt(); // Obtiene el estado del botón (1 para ON, 0 para OFF)
  if (buttonState == 1) {
    clearEEPROM(); // Borra la EEPROM cuando se inicia un nuevo proceso
    processInitialized = true; // Inicia el proceso cuando el botón está encendido
    previousMillis = millis(); // Reinicia el contador de tiempo
    dayCounter = 0; // Reinicia el contador de días
  } else {
    processInitialized = false; // Detiene el proceso cuando el botón está apagado
    previousMillis = 0; // Reinicia el contador de tiempo a 0
    dayCounter = 0; // Reinicia el contador de días a 0
    digitalWrite(HEATER_PIN, LOW); // Asegura que la calefacción está apagada
    digitalWrite(HEATER_INV_PIN, HIGH); // Asegura que la señal inversa está en HIGH
    Blynk.virtualWrite(V2, 0); // Envía "0" a V2 cuando la calefacción está apagada
    digitalWrite(MOTOR_PIN, HIGH); // Asegura que el motor está apagado
    Blynk.virtualWrite(V3, 0); // Envía "0" a V3 cuando el motor está apagado
    previousMillis = 0; // Reinicia también el tiempo transcurrido
    Blynk.virtualWrite(V4, 0); // Envía "0" a V4 para indicar que el tiempo transcurrido es 0
    downloadEEPROM(); // Descarga la información de la EEPROM al puerto serie
  }
}

```

Nota. Configuración para la Descarga de los Datos de la EPROM.

En el void loop, leemos el estado del botón digital y, si está en ON, inicializamos el proceso de fermentación, el contador de días y el temporizador. En esta función, se definen los rangos de temperatura para cada uno de los cuatro días de fermentación. Dependiendo del día, se configura el encendido o apagado del sistema de fermentación, y esta información se envía a los pines digitales de Blynk para visualizar el proceso desde la página web o la aplicación.

Además, se incluye una condición if que verifica si el tiempo transcurrido es igual a 24 horas. En ese caso, se enciende el motor encargado del volteo durante 2 minutos. Finalmente, se almacena la temperatura cada 5 minutos durante todo el proceso de fermentación, en la figura 23 observamos el void loop del proceso de fermentación.

Figura 23

Configuración del Void loop Principal del proceso de fermentación.

```

void loop() {
  // Verificar la conexión WiFi
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    digitalWrite(LED_PIN, HIGH); // Enciende el LED cuando está conectado
  } else {
    digitalWrite(LED_PIN, LOW); // Apaga el LED cuando no está conectado
    Serial.println("WiFi desconectado. Intentando reconectar...");
    WiFi.disconnect(); // Desconecta la red si está caída
    WiFi.reconnect(); // Intenta reconectar
    delay(5000); // Espera 5 segundos antes de intentar reconectar
  }

  // Verificar si la conexión Blynk está activa
  if (Blynk.connected()) {
    Blynk.run(); // Solo ejecutar Blynk.run() si está conectado a Blynk

    // Procesar los datos y enviarlos a Blynk
    int buttonState = digitalRead(BUTTON_PIN);
    if (buttonState == HIGH) {
      storeTemperatureInEEPROM();
    } else {
      clearEEPROM();
    }
  }

  if (processInitialized) {
    unsigned long currentMillis = millis(); // Obtiene el tiempo actual

    int rawValue = analogRead(NTC_PIN); // Lee el valor bruto del sensor NTC
    float temperatureC = thermistor(rawValue); // Convierte la lectura a temperatura en Celsius
    int temperatura = round(temperatureC); // Redondea el valor a un número entero

    // los rangos de temperatura para los 6 días de fermentación
    int tempMin = 0, tempMax = 0;
    if (dayCounter == 0) {
      tempMin = 45;
      tempMax = 50;
    } else if (dayCounter == 1) {
      tempMin = 45;
      tempMax = 50;
    } else if (dayCounter == 2) {
      tempMin = 45;
      tempMax = 50;
    } else if (dayCounter == 3) {
      tempMin = 45;
      tempMax = 50;
    } else if (dayCounter == 4) {
      tempMin = 45;
      tempMax = 50;
    } else if (dayCounter == 5) {
      tempMin = 45;
      tempMax = 50;
    }
  }

  // Control de la calefacción basado en el rango de temperatura
  if (temperatura < tempMin) {
    if (digitalRead(HEATER_PIN) == LOW) {
      digitalWrite(HEATER_PIN, HIGH); // Enciende la calefacción
      digitalWrite(HEATER_INV_PIN, LOW); // Apaga la señal inversa
      Blynk.virtualWrite(V2, 1); // Envía "1" a V2 cuando la calefacción está encendida
    }
  } else if (temperatura > tempMax) {
    if (digitalRead(HEATER_PIN) == HIGH) {
      digitalWrite(HEATER_PIN, LOW); // Apaga la calefacción
      digitalWrite(HEATER_INV_PIN, HIGH); // Enciende la señal inversa
      Blynk.virtualWrite(V2, 0); // Envía "0" a V2 cuando la calefacción está apagada
    }
  }

  // Activar el motor cada 24 horas a partir del segundo día durante 2 minutos
  if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
    previousMillis = currentMillis; // Actualiza el tiempo anterior
    dayCounter++; // Incrementa el contador de días

    if (dayCounter > 5) {
      processInitialized = false; // Detiene el proceso después de 6 días
    } else if (dayCounter >= 2) {
      digitalWrite(MOTOR_PIN, LOW); // Enciende el motor
      Blynk.virtualWrite(V3, 1); // Envía "1" a V3 cuando el motor está encendido
      delay(motorDuration); // Mantiene el motor encendido durante el tiempo especificado
      digitalWrite(MOTOR_PIN, HIGH); // Apaga el motor
      Blynk.virtualWrite(V3, 0); // Envía "0" a V3 cuando el motor está apagado
    }
  }
}

```

Nota. Código Principal para el Proceso de Fermentación.

Instalación de Hardware

Se implementó el sistema de hardware en el biorreactor, instalando los dispositivos de entrada y salida necesarios para controlar automáticamente el proceso de fermentación. Entre estos dispositivos se incluyen el motor, el calentador, el sistema de control IoT y las fuentes de alimentación, los cuales operan de manera autónoma.

En la Figura 24 se muestra la instalación del calentador en el interior del biorreactor, cuyo propósito es mantener la temperatura interna del barril. El encendido y apagado del calentador está controlado por un sensor de temperatura NTC ubicado en la parte inferior del barril, encargado de enviar la información al controlador ESP32. Este controlador, a su vez, está conectado a través de Wi-Fi al servidor de Blynk, el cual procesa los datos sobre temperatura, tiempo transcurrido en la fermentación, encendido y apagado del motor, y el inicio del proceso de fermentación. Basado en esta información, el ESP32 activa o desactiva el calentador según sea necesario. Todos los datos se muestran en tiempo real en la aplicación y la interfaz web. Para acceder a la información en tiempo real, se utiliza una cuenta de usuario previamente creada en la página de Blynk, lo que permite monitorear el proceso desde cualquier parte del mundo.

Figura 24

Instalación de Celda de Calefacción.



Nota. Instalación de Celdas de Calor en el Barril Fermentador.

En la figura 25, observamos la instalación del motorreductor, el cual se encarga de realizar el volteo del cacao cada 24 horas, controlado por el ESP32 y el módulo Relay de 2 canales.

Figura 25

Instalación del Motorreductor.



Nota. Instalación de Motorreductor Para el Giro de Cacao.

En la figura 26, observamos la instalación de la tarjeta de control ESP32, que se encarga de gestionar todo el proceso de fermentación. Junto con ella, se encuentra la etapa de potencia, compuesta por relés, y una tarjeta de señales que recibe las señales del sensor y muestra el estado del calefactor, el motor y la conexión a la red Wifi.

Figura 26

Instalación del Controlador IoT.



Nota. Instalación de la Tarjeta de Control del Dispositivo.

En la figura 27 encontramos la implementación general del control automático de temperatura funcionando y enviando la información por medio de la tecnología IoT.

Figura 27

Instalación Final del Sistema.

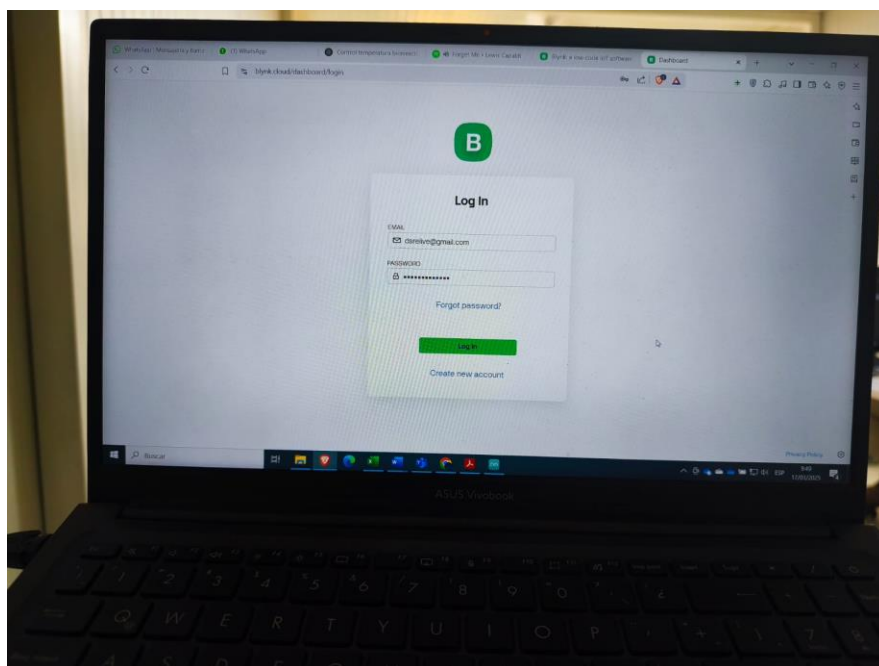


Nota. Dispositivo Fermentador con Todos sus Componentes.

En la figura 28 se ilustra el proceso de conexión al servidor de Blynk, donde se requiere la autenticación mediante el ingreso de usuario y contraseña en la interfaz web. Este paso es esencial para iniciar sesión en la plataforma y acceder al panel de control del sistema de fermentación. Una vez autenticado, se habilita la visualización en tiempo real de las variables del proceso de fermentación como temperatura, estado del motor; Lo que permite monitorear y gestionar las diferentes condiciones del sistema de manera remota a través de la interfaz web proporcionada por Blynk.

Figura 28

Ingreso a la Web Blynk.



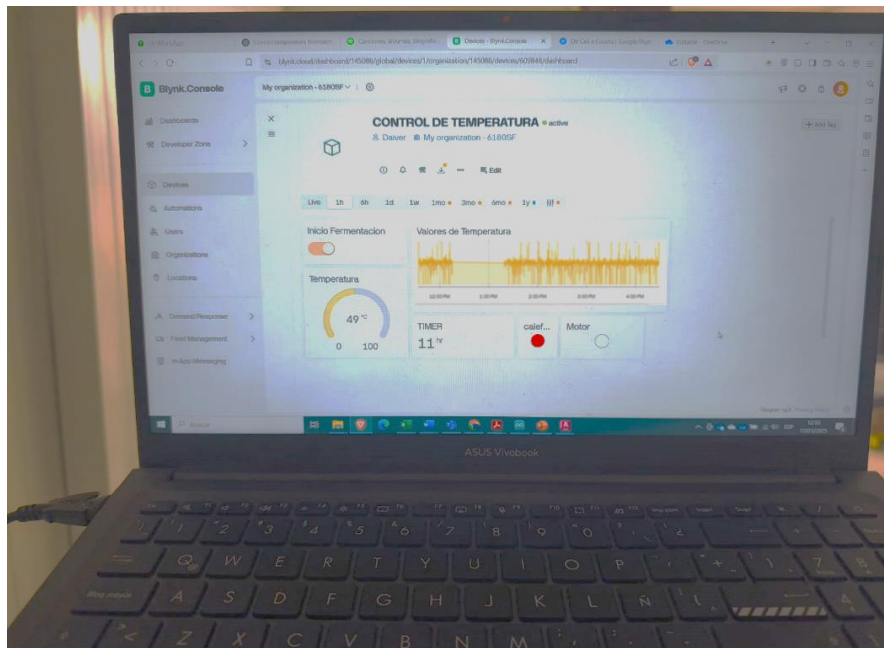
Nota. Imagen del Ingreso a la Web.

En la figura 29 se muestra el seguimiento en tiempo real del proceso de fermentación, realizado de manera remota a través del servidor de Blynk. Este sistema permite monitorear las diferentes variables, como temperatura, tiempo transcurrido, estado de la calefacción, el estado

del motor y la curva de temperatura. Todo esto se logra gracias a la tecnología IoT, que facilita la interconexión de los equipos para un control más eficiente del proceso de manera remota.

Figura 29

Interfaz web del Sistema de Fermentación.



Nota. Interfaz Web Online desde el PC.

En la figura 30 se muestra el seguimiento del proceso de fermentación desde la aplicación de Blynk. Al ingresar con el usuario y contraseña creados con anterioridad para el sistema de fermentación, logramos monitorear en tiempo real el proceso de fermentación, observando las variables como la temperatura, estado de la calefacción, estado del motor y la gráfica de temperatura. Tanto desde la aplicación como desde la página web, contamos con la posibilidad de iniciar o finalizar el proceso de fermentación de manera remota.

Figura 30

App Usuario Final Blynk.



Nota. Aplicación del Sistema de Fermentación Blynk.

Pruebas de Funcionamiento Fase 1

Las pruebas de funcionamiento se llevaron a cabo utilizando cacao de la región de Norte de Santander, específicamente de la variedad criollo, representado en la Figura 31. Se seleccionaron un total de 10 mazorcas, cada una elegida cuidadosamente para garantizar la mejor calidad. A partir de ahí, se inició el proceso de fermentación, el cual se desarrolló durante un periodo de 6 días.

Figura 31

Cacao Criollo Seleccionado para la Prueba de Fermentación.

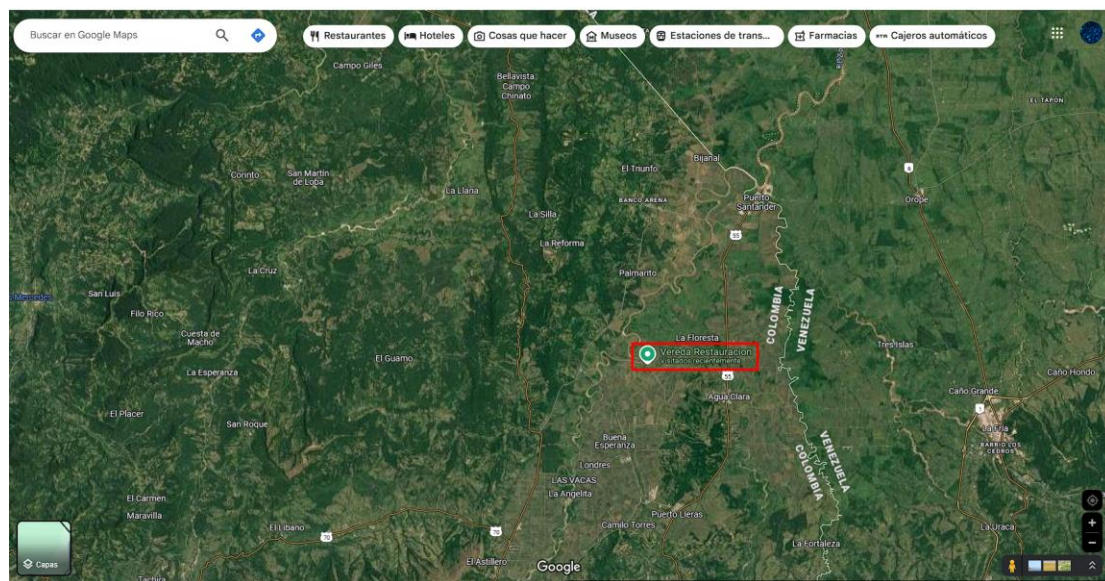


Nota. Mazorcas de Cacao.

Se realizó la selección de las mazorcas de cacao provenientes del cultivo de la finca del señor Don Floro ubicada en la vereda restauración del departamento de Norte de Santander en la figura 32 observamos la ubicación de la finca desde se obtuvieron las muestras de Cacao, donde se pudo observar todo el proceso de cultivo y las prácticas agrícolas empleadas para el manejo de la especie. Posteriormente, se procedió a abrir cada una de las mazorcas con un cuchillo, separando cuidadosamente la cáscara del cacao como se observa en la figura 33, asegurando el debido cuidado durante todo el proceso.

Figura 32

Ubicación de la Finca.



Nota. Ubicación de donde se Obtuvieron las muestras de Cacao.

Figura 33

Frutos de la Mazorca de Cacao.



Nota. Granos de la Mazorca de Cacao.

Continuamente se pesa todo el cacao recolectado de las 10 mazorcas arrojando un peso de 1.129 gramos aproximadamente.

Figura 34

Grano de Cacao Obtenido de las Mazorcas.



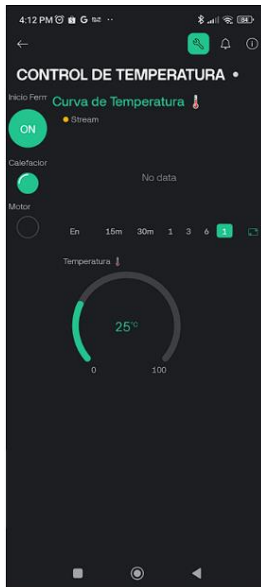
Nota. Peso de los Granos de Cacao Obtenidos.

Inicio de Pruebas

Con este cacao, se dio inicio al proceso de fermentación en el barril, donde se agregaron todas las muestras. A continuación, se abrió la aplicación (Figura 35) en la APP del celular, ingresando el usuario y la contraseña. Luego, se pulsó el botón de "ON", lo que activó el proceso de fermentación, el cual se llevó a cabo durante los siguientes 6 días.

Figura 35

Aplicación del Proceso de Fermentación.



Nota. Interfaz Gráfica de la Aplicación. (*Dashboard*, s. f.).

Figura 36

Inicio del proceso de Fermentación.



Nota. Granos de Cacao en el Barril Fermentador.

Muestras de Cacao Después del Proceso de Fermentación

Durante los primeros seis días, se observó que, a partir de las primeras horas, el cacao no lograba alcanzar la temperatura adecuada para su fermentación. Esto se debió a la falta de calor y a que las celdas de calor estaban demasiado alejadas de las muestras, lo que impedía que se

alcanzara la temperatura óptima de entre 45 y 50 grados Celsius. Esta temperatura es crucial para evitar que las semillas maduren prematuramente y desarrollen raíces, lo cual puede comprometer la calidad del cacao y afectar la producción.

Aunque el proceso se llevó a cabo durante los seis días, como se puede evidenciar en la figura anterior, las pruebas no fueron exitosas. Al no alcanzar la temperatura adecuada, las semillas comenzaron a desarrollar raíces y se formaron microorganismos que no son característicos de una fermentación adecuada. A continuación, se presentan las evidencias del proceso realizado.

Se observó que el sistema de poleas y correas, al intentar realizar el giro, no ofrecía un buen agarre entre las poleas, lo que provocaba que la correa y las poleas patinaran. Esto impedía una adecuada transmisión de la fuerza desde el motorreductor hacia el eje del barril. Como solución, se decidió reemplazar las poleas convencionales por poleas dentadas y utilizar una correa de transmisión dentada, con el objetivo de evitar el deslizamiento de las poleas y asegurar que toda la fuerza del motorreductor se transfiriera correctamente al eje del barril. De esta manera, se logró optimizar el proceso de volteo del cacao.

Figura 37

Resultados de la Fermentación.



Nota: Granos de Cacao Después del Proceso de Fermentación.

Pruebas de Funcionamiento Fase 2

En la segunda fase del proceso, se modificó la ubicación de las celdas de temperatura, trasladándolas de la parte superior a la parte inferior del sistema. Además, se añadió una celda de temperatura en cada uno de los costados del barril, creando una especie de socavón entre el barril y la parte externa. Esta configuración permitió aislar las celdas de calor del cacao, evitando el contacto directo con los granos y asegurando que el calor se distribuyera de manera más eficiente. Gracias a estos ajustes, se logró alcanzar la temperatura interna adecuada para el proceso de fermentación, lo que resultó en una mejora significativa en el control de la temperatura durante la fase de fermentación figura 38.

Figura 38

Adecuación de Celda de Calor a los Costados.



Nota: Adaptación de Celdas de Calor al Costado del Fermentador.

Se realizó el reemplazo de las poleas lisas por poleas dentadas, junto con una correa dentada, lo que mejoró significativamente el agarre entre las poleas y permitió una transmisión de fuerza más eficiente desde el motor hacia el eje del barril. Este cambio optimizó el giro del

barril y facilitó el volteo adecuado de los granos durante el proceso de fermentación, asegurando un mejor control y rendimiento en la fermentación del cacao como se observa en la figura 39.

Figura 39

Adecuación de Poleas Dentadas.



Nota. Instalación de Poleas Dentadas al Barril Fermentador.

Se reacondicionó la distribución de las tarjetas de control para mejorar el seguimiento de cualquier eventualidad durante el proceso. Se incorporó una caja de registro con tapa transparente ver figura 40, lo que permitió visualizar los estados de los Leds y facilitar el monitoreo en tiempo real de todo el proceso de fermentación. Además, se reorganizaron las tarjetas de control y potencia, con el objetivo de optimizar la disposición de los elementos electrónicos con el fin de asegurar un funcionamiento más eficiente y accesible durante la operación.

Figura 40

Adecuación de Tarjetas de Control



Nota. Instalación de Tarjetas de Control y Potencia

Inicio de las Pruebas

El sábado 9 de noviembre 2024, se seleccionaron las muestras de cacao del agricultor Don Ramón Serrano, provenientes del municipio de Sardinata, en el departamento de Norte de Santander. Para iniciar el proceso de fermentación, se eligieron muestras que sumaban un peso aproximado de 871 gramos como se evidencia en la figura 41. E iniciamos las pruebas de fermentación.

Figura 41

Peso de las Muestras de Cacao.



Nota. Peso de los Granos de Cacao.

Figura 42*Muestras de Cacao.*

Nota. Recolección de Granos de Cacao.

El controlador ESP32 ha sido configurado con el código de control necesario, incluyendo los parámetros de conexión Wi-Fi y la configuración requerida para vincularse a la plataforma Blynk. El objetivo de esta configuración es controlar y monitorear la temperatura durante el proceso de fermentación, que se extenderá por 6 días. El ESP32 se encargará de censar continuamente la temperatura y enviará los datos a Blynk a través de la red Wi-Fi. De esta manera, el proceso de fermentación podrá ser supervisado en tiempo real desde cualquier parte del mundo, ya sea utilizando la aplicación móvil de Blynk o accediendo a la página web, proporcionando un control remoto y constante sobre las condiciones del proceso de fermentación.

En esta segunda fase, realizamos varias adecuaciones al código de control del ESP32, incluyendo dos funciones clave para mejorar la estabilidad y confiabilidad del sistema. Una de las funciones añadidas como se observa en la figura 43, supervisa el estado de la conexión Wi-Fi,

actualizando el indicador LED para reflejar el estado de la conexión en todo momento. Si la conexión Wi-Fi se pierde, esta función intentará reconectarse automáticamente, garantizando que el dispositivo mantenga una conexión estable y continúe enviando los datos en tiempo real. De esta forma, aseguramos una conexión constante y confiable, lo que es crucial para monitorear el proceso de fermentación sin interrupciones.

Figura 43

Verificación de Conexión Wifi.

```

144 void loop() {
145     // Verificar la conexión WiFi
146     if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
147         digitalWrite(LED_PIN, HIGH); // Enciende el LED cuando está conectado
148     } else {
149         digitalWrite(LED_PIN, LOW); // Apaga el LED cuando no está conectado
150         Serial.println("WiFi desconectado. Intentando reconectar...");
151         WiFi.disconnect(); // Desconecta la red si está caída
152         WiFi.reconnect(); // Intenta reconectar
153         delay(5000); // Espera 5 segundos antes de intentar reconectar
154     }
155 }

```

Nota. Configuración de Código Para la Verificación de la Conexión Wifi.

La segunda función del sistema se encarga de verificar el estado de la conexión a Blynk. Si la conexión es correcta, esta función enviará los datos actualizados de manera continua a la plataforma, asegurando que solo se transmitan datos válidos y actualizados. Esto previene que se envíen datos obsoletos en caso de que no haya conexión, evitando saturar el servidor de Blynk.

En caso de que la conexión a Blynk se pierda, el código de control intentará reconectar automáticamente hasta que la conexión se restablezca de manera exitosa. Esta función garantiza que siempre haya una comunicación constante y fiable con Blynk, asegurando la transmisión de datos en tiempo real y evitando problemas de sincronización o sobrecarga del servidor ver figura 44.

Figura 44*Verificación de Conexión Blynk.*

```

156 // Verificar si la conexión Blynk está activa
157 if (Blynk.connected()) {
158   Blynk.run(); // Solo ejecutar Blynk.run() si está conectado a Blynk
159
160   // Procesar los datos y enviarlos a Blynk
161   int buttonState = digitalRead(BUTTON_PIN);
162   if (buttonState == HIGH) {
163     storeTemperatureInEEPROM();
164   } else { ...
165   }
166 }
167
168 > if (processInitialized) { ...
169 }
241
242
243 } else {
244   // Si Blynk no está conectado, intentamos reconectar
245   Serial.println("Reconectando a Blynk...");
246   Blynk.begin(auth, ssid, pass); // Reconectar a Blynk
247   delay(1000); // Esperar un segundo antes de intentar nuevamente
248 }
249 }

```

Nota. Código de Conexión a Blynk.

Para iniciar el proceso de fermentación en la interfaz gráfica de la figura 45, se encuentran diversos widgets, que permiten monitorear y controlar los diferentes estados del proceso de fermentación. A continuación, se detallan los widgets disponibles estos widgets son los mismos tanto para la interfaz web como la interfaz Android:

1. **Botón de inicio de fermentación:** Este widget es el encargado de iniciar el proceso de fermentación, que se llevará a cabo durante los seis días siguientes. Si el botón se encuentra en **off**, se detendrá todo el proceso de fermentación y se borrará la información almacenada en la EEPROM, lo que reiniciará el ciclo de fermentación.
2. **Indicador de temperatura:** Este widget muestra en tiempo real la temperatura interna del barril. Su valor se actualiza de manera automática conforme la temperatura varíe, permitiendo que el agricultor tenga una visualización continua y precisa del estado térmico del grano. Esto es esencial para asegurar que la fermentación se lleve a cabo bajo condiciones óptimas.

3. **Indicador de tiempo transcurrido:** Este widget es crucial para llevar un control detallado del tiempo durante el proceso de fermentación. Muestra las horas transcurridas desde que comenzó el proceso, permitiendo al agricultor saber cuánto tiempo ha pasado y asegurarse de que se está cumpliendo con el tiempo necesario para la fermentación.

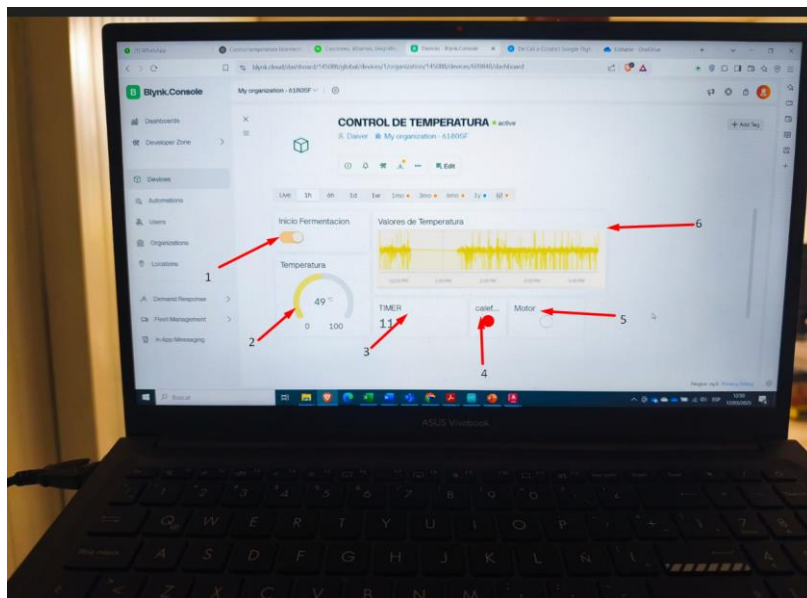
4. **LED de estado (celdas de calor):** Este widget utiliza un indicador en color **rojo** para señalar cuando las celdas de calor están encendidas. Esto permite al agricultor visualizar de manera rápida si el sistema de calefacción está funcionando correctamente para mantener la temperatura adecuada durante la fermentación.

5. **Indicador de estado del motor:** Representado por un LED de color **azul**, este widget muestra el estado del motor que controla el proceso de fermentación. El color azul indica cuando el motor está encendido o apagado, permitiendo al agricultor verificar si el motor está funcionando correctamente y asegurarse de que el proceso de volteo se esté realizando correctamente.

6. **Curva de temperatura:** Este widget presenta una representación gráfica de la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo. La curva es esencial para identificar los picos de temperatura y monitorear cómo la temperatura interna del barril se mantiene dentro de los parámetros adecuados para una fermentación eficiente. Además, la curva permite observar posibles fluctuaciones y garantiza que el proceso se realice de manera correcta, optimizando el uso de energía.

Figura 45

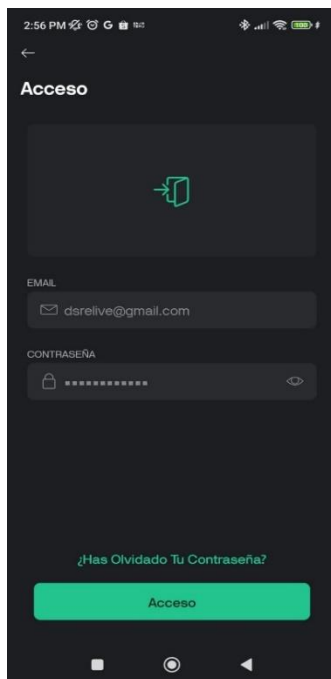
Aplicación Web Inicio del Proceso de Fermentación.



Nota. Interfaz Web del Control de Temperatura en Blynk.

Figura 46

Aplicación Android Inicio.



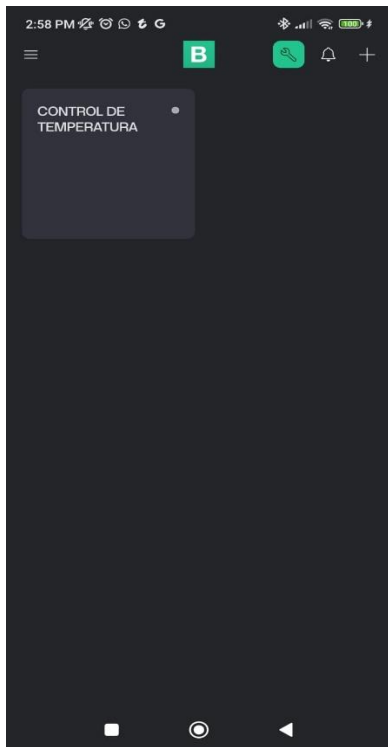
Nota: Usuario y Contraseña de la Aplicación Blynk (*Dashboard*, s. f.).

Para iniciar el proceso desde la aplicación de Blynk, primero debemos descargar la aplicación desde la Play Store. Una vez instalada, ingresamos el usuario y contraseña previamente registrados en la plataforma web de Blynk, tal como se muestra en la figura 46.

A continuación, seleccionamos el equipo denominado Control de Temperatura, como se observa en la figura 47. Esto nos dará acceso a la interfaz gráfica donde podremos monitorear en tiempo real el proceso de fermentación. Gracias a la tecnología IoT, podremos controlar el proceso de fermentación de manera remota desde cualquier lugar del mundo, utilizando nuestro teléfono Android, como se ilustra en la figura 48.

Figura 47

Aplicación Android Control de Temperatura.



Nota. Selección de Dispositivo Control de Temperatura (*Dashboard*, s. f.).

Figura 48

Aplicación Android Interfaz Gráfica.



Nota: Interfaz Gráfica de la Aplicación Android (Dashboard, s. f.).

Iniciamos el proceso de fermentación de la interfaz pulsando el botón de inicio de fermentación, automáticamente el sistema empieza a censar la temperatura interna del cacao y a realizar el control automático enciendo o apagando el calentador manteniendo la temperatura en los rangos de 45° a 50° este monitoreo lo realizamos remotamente a través de internet aplicando las tecnologías IoT.

Durante las primeras 10 horas del proceso de fermentación como se visualiza en la figura 49, se observó que la temperatura interna del barril se mantuvo de manera constante dentro del rango predefinido en el código de control, lo cual indica que el sistema de regulación térmica está operando correctamente. Este comportamiento estable de la temperatura es fundamental para asegurar que el proceso de fermentación se desarrolle en condiciones óptimas. A lo largo de este

período, la temperatura se mantuvo dentro de los parámetros establecidos (entre 45° y 50° C), lo que asegura que las reacciones bioquímicas necesarias para la fermentación del cacao se estén llevando a cabo de forma adecuada.

El monitoreo constante a través de la interfaz web permitió verificar que no hubo fluctuaciones significativas en la temperatura, lo cual es un indicativo de que el sistema de control térmico, incluyendo las celdas de calor y su distribución, está funcionando de manera eficiente. Este control preciso de la temperatura es esencial para evitar el desarrollo de microorganismos no deseados.

Figura 49

Interfaz Web del Fermentador 10 Horas.



Nota: Primeras 10 Horas de Funcionamiento.

Durante las primeras 14 horas del proceso de fermentación, no se presentaron novedades y el monitoreo constante a través de la página web permitió verificar que la temperatura se mantuvo dentro del rango asignado en el código. Esta estabilidad en la temperatura es clave para asegurar el desarrollo adecuado del proceso de fermentación, lo que refleja un funcionamiento correcto y controlado del sistema ver figura 50.

Figura 50

Interfaz Web Fermentador de Cacao 14 Horas.

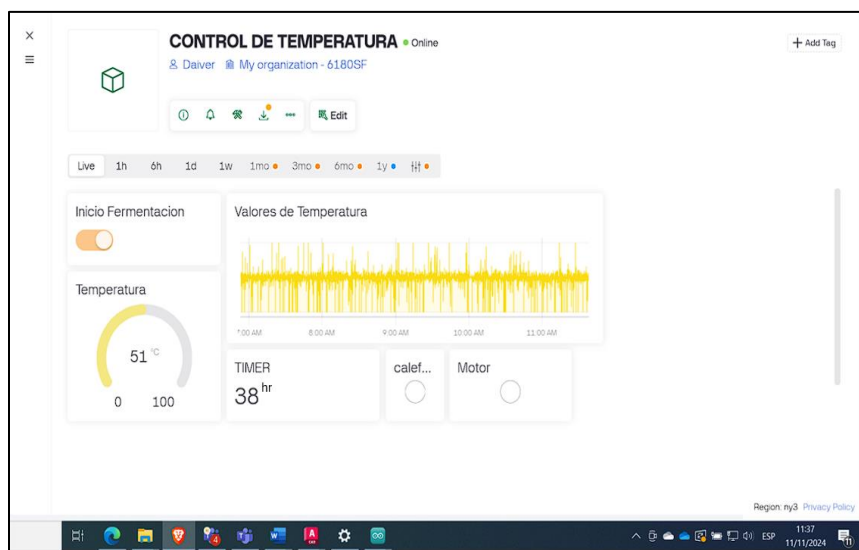


Nota. Primeras 14 horas de Funcionamiento del fermentador de Cacao.

Pasadas las 38 horas logramos evidenciar picos altos de temperatura queriendo decir que la temperatura interna del barril ya se encuentra en todo el contorno del área del barril figura 51.

Figura 51

Interfaz Web Fermentador de Cacao 38 Horas.

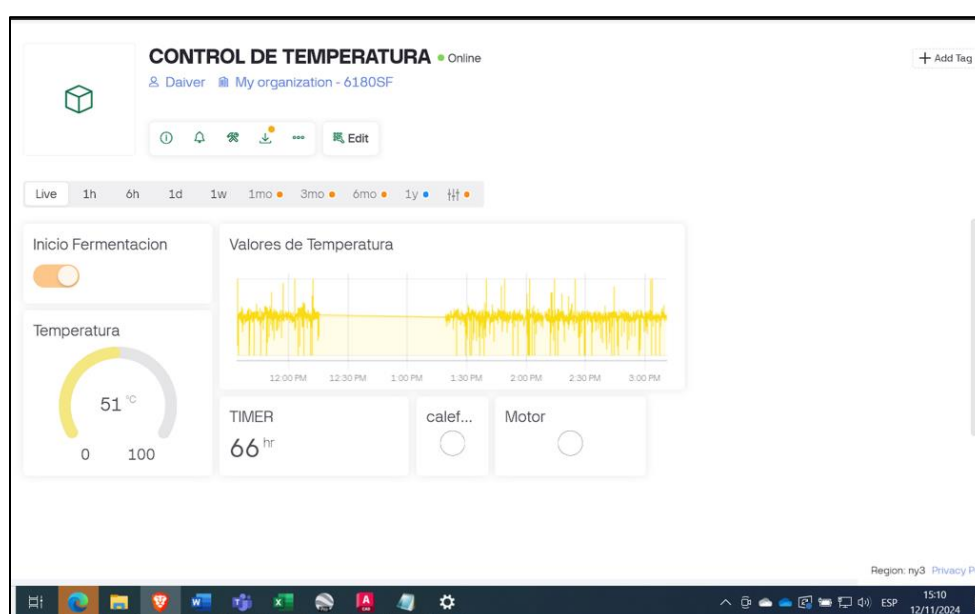


Nota. 38 Horas Del Funcionamiento del Barril Manteniendo la Temperatura Interna.

Después de 66 horas, el barril logró mantener la temperatura interna durante un periodo prolongado, como se puede observar en la figura 52. La temperatura se mantuvo constante entre las 12:00 y la 1:00 pm, lo que indica un buen control térmico y estabilidad en el proceso de fermentación. Este comportamiento constante es crucial para asegurar que el cacao se fermente correctamente y alcance la calidad deseada.

Figura 52

Interfaz Web Fermentador de Cacao 66 Horas.

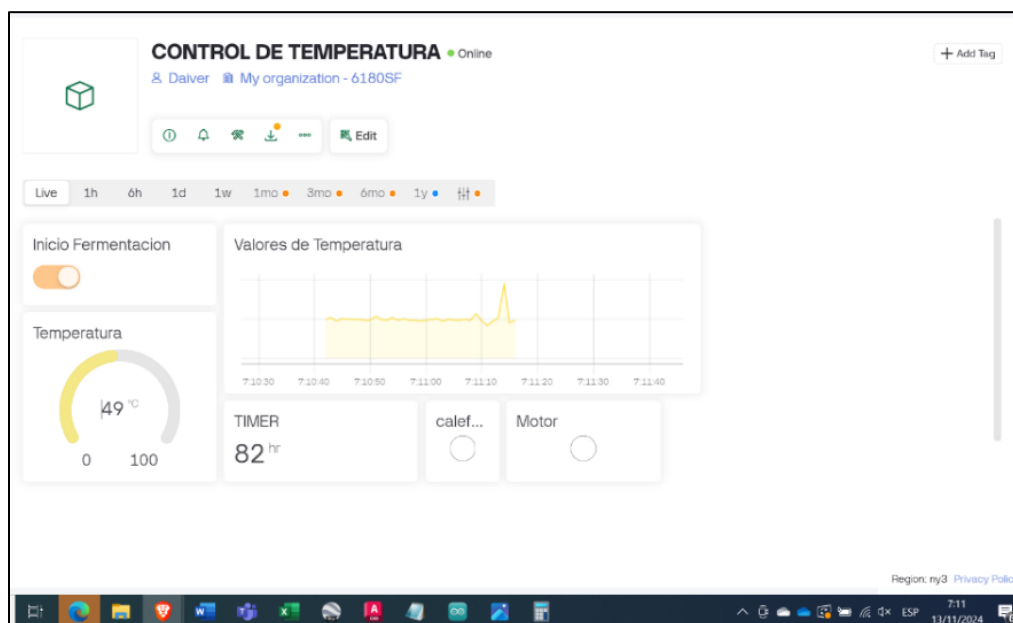


Nota. 66 Horas del Funcionamiento del Barril Manteniendo la Temperatura Interna.

Durante el período de 82 horas, en la figura 53 observamos que la temperatura interna del barril se mantiene estable sin necesidad de que la calefacción esté encendida ni de utilizar la celda de calor. Esto demuestra que el barril es capaz de conservar la temperatura interna durante un largo tiempo, lo que contribuye al ahorro de energía en el proceso de fermentación.

Figura 53

Interfaz Web Fermentador de Cacao 82 Horas.

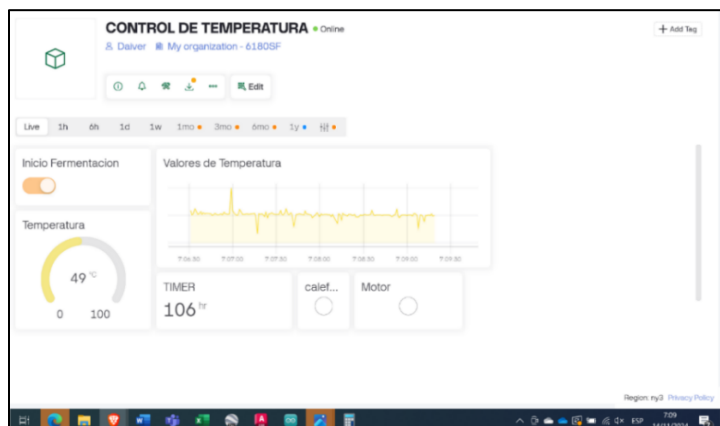


Nota: 82 Horas del Funcionamiento del Barril Manteniendo la Temperatura Interna.

A las 106 horas, el sistema sigue funcionando correctamente. En la gráfica de la Figura 54, en el widget de fermentación, se puede observar que la temperatura se mantiene constante durante todo este tiempo. El monitoreo se ha realizado de manera remota a través de la interfaz IoT, lo que garantiza un control continuo de la temperatura interna del cacao y facilita su supervisión de manera eficiente y constante. Esto beneficia significativamente a los agricultores, ya que les permite realizar otras tareas agrícolas sin necesidad de revisar constantemente la temperatura de los granos, reduciendo el riesgo de que la producción de cacao se vea afectada.

Figura 54

Interfaz Web Fermentador de Cacao 106 Horas.



Nota. 106 Horas del Funcionamiento del Barril Manteniendo la Temperatura Interna.

Al finalizar el sexto día de fermentación figura 55, el sistema se mantiene estable con una temperatura interna constante, lo que nos permite concluir que el proceso de fermentación ha sido exitoso. Gracias a la implementación de las nuevas celdas y el monitoreo constante a través de IoT, el sistema de fermentación no experimentó ninguna falla durante todo el proceso, logrando así concluir de manera satisfactoria los 6 días de fermentación.

Figura 55

Interfaz Web Fermentador de Cacao 140 Horas.



Nota. 140 Horas del Funcionamiento del Barril Manteniendo la Temperatura Interna.

Muestras de cacao Después del Proceso de Fermentación

Se realizó la verificación de las muestras de cacao fermentadas durante los 6 días ver figura 56, obteniendo como resultado una fermentación exitosa. Durante este tiempo, el sistema se mantuvo estable, con una temperatura interna constante, lo que permitió concluir que el proceso fue exitoso. Se logró evitar el crecimiento interno de la raíz y se alcanzó una fermentación completa del 100% de los granos procesados, gracias al control preciso de la temperatura y al monitoreo constante mediante tecnología IoT. Este enfoque permitió mantener condiciones óptimas durante todo el proceso, asegurando la calidad del cacao fermentado y evitando posibles fallas. Al concluir los 6 días de fermentación, se logró un proceso eficiente y controlado, garantizando un producto de alta calidad.

Figura 56

Muestras de Cacao Fermentadas.



Nota. Granos De Cacao Fermentados Exitosamente.

Conclusiones

Tras realizar las primeras pruebas de funcionamiento, se identificaron dos problemas principales que afectaban al rendimiento del prototipo: la falta de temperatura suficiente para cubrir toda la superficie del barril y la inestabilidad del sistema que provocaba reinicios y pérdidas de información. Estos hallazgos fueron cruciales para mejorar el sistema de fermentación.

Para abordar la falta de temperatura, se incrementó la cantidad de celdas de calor, lo que permitió distribuir mejor el calor y garantizar que toda la superficie del barril alcanzara la temperatura adecuada. Además, se optimizó el código para asegurar un control más específico y estable de las variables del sistema, lo que contribuyó a una mayor eficiencia en el funcionamiento general.

Durante el proceso de pruebas, se detectó que existía una transferencia inadecuada de la energía mecánica desde el motorreductor hasta las aspas del barril, lo que afectaba la eficiencia del sistema de volteo. Ante esta situación, se decidió realizar una modificación significativa en el sistema de transmisión: se reemplazaron las poleas lisas por poleas dentadas, y la correa lisa fue sustituida por una correa dentada. Esta mejora permitió una transferencia de energía más eficiente y precisa, mejorando el rendimiento del sistema de volteo del grano, lo que resultó en una mayor eficacia y fiabilidad del proceso de fermentación.

Para solucionar este problema, se integró un código que verifica continuamente la conexión a la red Wi-Fi. En caso de que la conexión no esté establecida, el sistema intenta reconectar automáticamente, lo que garantiza que el proceso de fermentación se mantenga activo sin interrupciones. Esta solución mejoró la estabilidad del sistema y evitó pérdidas de información.

Finalmente, para evitar saturar el servidor de Blynk, se implementó una función que comprueba la conexión WiFi antes de enviar los datos actualizados; Si no hay una conexión estable, los datos no se envían, lo que previene la acumulación de información en cola y la saturación de la comunicación con el servidor cuando se restablezca la conexión.

Por otro lado, la estabilización de la conexión Wi-Fi fue un aspecto clave para evitar las desconexiones y la pérdida de información. Con los ajustes realizados al código, se logró una mejora considerable en la fiabilidad de la conexión, lo que permitió que el sistema operara de manera continua sin interrupciones.

El sistema de monitoreo y control de la temperatura basado en el ESP32 y la plataforma Blynk demostró ser altamente efectivo para mantener la temperatura interna del barril dentro del rango óptimo de 45°C a 50°C durante el proceso de fermentación. Este control constante fue esencial para asegurar que las reacciones bioquímicas necesarias para la fermentación del cacao se llevaran a cabo correctamente, evitando fluctuaciones que podrían haber afectado negativamente la fermentación del cacao.

Una de las mayores ventajas del sistema fue la capacidad del barril para mantener una temperatura constante, especialmente después de 82 horas de fermentación, sin necesidad de calefacción adicional. Este comportamiento resalta la eficiencia energética del sistema, lo que contribuye significativamente a la reducción del consumo de energía y hace que el proceso de fermentación sea más sostenible.

A lo largo de las 140 horas (6 días) de fermentación, el sistema demostró un rendimiento estable, con las temperaturas logrando mantenerse dentro del rango predefinido. Además, no se observaron fallos en el funcionamiento del sistema de control, lo que refleja la exitosa implementación de la solución del sistema de monitoreo y control de temperatura.

Al finalizar los 6 días de fermentación, se comprobó que el proceso fue exitoso. La temperatura interna del barril se mantuvo estable, lo que evitó el desarrollo de microorganismos no deseados y permitió que el 100% de los granos de cacao completaran su proceso de fermentación. La implementación del sistema IoT permitió un control preciso, asegurando no solo la fermentación exitosa, sino también un monitoreo y volteo automático sin necesidad de intervención humana.

El uso de tecnología IoT en el monitoreo y control del proceso de fermentación del cacao resultó en un producto de buena calidad. El adecuado control de la temperatura y la verificación constante durante las 140 horas de fermentación evitaron posibles fallas durante el proceso, manteniendo las condiciones ideales durante todo el proceso y contribuyendo directamente a la calidad final del cacao.

En conclusión, el sistema implementado con tecnología IoT para el monitoreo y control del proceso de fermentación de cacao demostró ser una solución efectiva para mantener las condiciones óptimas durante la fermentación, optimizando el consumo energético y garantizando la calidad del producto final, marcando un avance significativo en la industria de la fermentación del cacao a los agricultores del departamento.

Referencias

(S/f). Communica.co.za.

<http://archive.communica.co.za/Content/Catalog/Documents/D0874195159.pdf>

(S/f). Educa.co.

<https://unipaz.edu.co/omp/index.php/editorial/catalog/download/54/53/284?inline=1>

(S/FB).Unican.es.

[https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/25340/442082.pdf?sequence=](https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/25340/442082.pdf?sequence=1)

[1](https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/25340/442082.pdf?sequence=1)

(S/f-c). Espressif.com, de

https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf

(S/f-d). Clvaw-cdnwnd.com. de [https://c1555f5ec9.clvaw-](https://c1555f5ec9.clvaw-cdnwnd.com/34662fcf1f1e607c561442431023ac8e/200007780-ee87cef81a/B3435%20Datasheet.pdf)

[cdnwnd.com/34662fcf1f1e607c561442431023ac8e/200007780-](https://c1555f5ec9.clvaw-cdnwnd.com/34662fcf1f1e607c561442431023ac8e/200007780-ee87cef81a/B3435%20Datasheet.pdf)

[ee87cef81a/B3435%20Datasheet.pdf](https://c1555f5ec9.clvaw-cdnwnd.com/34662fcf1f1e607c561442431023ac8e/200007780-ee87cef81a/B3435%20Datasheet.pdf)

Arduino - home. (s. f.). <https://www.arduino.cc/>

Balkhaya, Balkhaya & Ilham, Dirja & Candra, Rudi & Hasbaini, Hasbaini & Anugreni, Fera.

(2020). Designing an Arduino-based Automatic Cocoa Fermentation Tool. SinkrOn. 5.

92-99. 10.33395/sinkron. v5i1.10611.

Carrillo Castellanos, J. J. (2022). Desarrollo de un prototipo de fermentador cilíndrico con

control de temperatura, humedad y agitación durante el proceso de fermentación del

cacao. Desarrollo de un Prototipo de Fermentador Cilíndrico Con Control de

Temperatura, Humedad y Agitación Durante el Proceso de Fermentación del Cacao.

<https://repositorio.unbosque.edu.co/server/api/core/bitstreams/8a636dae-651c-4ee5-9fc9-4e1ce037fe88/content>

Dashboard. (s. f.). <https://blynk.cloud/dashboard/login>

Díaz, L., Pinoargote, M., & Castillo, P. (2013). Análisis de las características organolépticas del chocolate a partir de cacao ccn51 tratado enzimáticamente y tostado a diferentes temperaturas.

ESPDUINO-32 - Geekworm Wiki. (s. f.). <https://wiki.geekworm.com/ESPDUINO-32>

Figuroa, J, L(2023) Diseño y Ensamble de un Biorreactor Automatizado para el Proceso de Fermentación del Cacao.

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/56194/jlfiguroasa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Guzman Alvarez, Romel & Márquez-Ramos, José. (2021). Fermentation of Cocoa Beans. 10.5772/intechopen.98756.

Guzmán Farfán, L., Castro Sánchez, M., Cruz Alcedo, G., & Arbulú Zuazo, A. (2021). Diseño de un fermentador cilíndrico automatizado para la fermentación de cacao criollo piurano. Revista de Innovación y Transferencia Productiva, 1(2), e002. <https://doi.org/10.54353/ritp.v1i2.e002>

Guzmán-Armenteros, T. M., Ruales, J., Villacís-Chiriboga, J., & Guerra, L. S. (2023). Experimental prototype of electromagnetic emissions for biotechnological research: Monitoring cocoa bean fermentation parameters. Foods (Basel, Switzerland), 12(13), 2539. <https://doi.org/10.3390/foods12132539>

Guzmán-Armenteros, TM, Ruales, J., Villacís-Chiriboga, J., & Guerra, LS (2023). Prototipo experimental de emisiones electromagnéticas para investigaciones biotecnológicas:

- Monitoreo de parámetros de fermentación del grano de cacao. *Foods* (Basilea, Suiza) , 12 (13), 2539. <https://doi.org/10.3390/foods12132539>
- JGY370-10 12VDC 90 degrees High torque metal geared DC motors. (s. f.).
archive.communicaco.za. <http://archive.communicaco.za/Content/Catalog/Documents/D0874195159.pdf>
- Leal, G. A., Gomes, L. H., Efraim, P., de Almeida Tavares, F. C., & Figueira, A. (2008).
Fermentation of cacao (*Theobroma cacao* L.) seeds with a hybrid *Kluyveromyces marxianus* strain improved product quality attributes. *FEMS Yeast Research*, 8(5), 788–798. <https://doi.org/10.1111/j.1567-1364.2008.00405.x>
- Lima, M. (2020). "Fermentation: A crucial stage in cocoa processing." *Journal of Food Science and Technology*, 57(1), 1-10.
- Llerena, W. F. T. (s/f). (*Theobroma cacao* L.) Variedad Nacional y Variedad CCN51. Core.ac.uk. <https://core.ac.uk/download/pdf/223061502.pdf>
- Maritza, D. (2006). Fermentación de cacao (teobroma cacao) variedad ccn-51 inoculado acetobacter
. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/3341/1/P80%20Ref.2969.pdf>
- Modulo Rele De 2 Canales. (S. F.). Mactronica. <https://www.mactronica.com.co/modulo-rele-de-2-canales>
- Parra Portillo, S., & Doval Sanchez, J. C. (2023). Alerta Inteligente Con Arquitectura Iot Para El Seguimiento Y Monitoreo De La Fermentación Del Cacao [Ingeniería De Sistemas Y Telecomunicaciones, Universidad De Córdoba].
<https://Repositorio.Unicordoba.Edu.Co/Server/Api/Core/Bitstreams/71b15e21-474e-4a28-9914-E0ff8ea46880/Content>

- Racine, K., Lee, A., Wiersema, B., Huang, H., Lambert, J., Stewart, A., & Neilson, A. (2019). Development and characterization of a pilot-scale model cocoa fermentation system suitable for studying the impact of fermentation on putative bioactive compounds and bioactivity of cocoa. *Foods (Basel, Switzerland)*, 8(3), 102.
<https://doi.org/10.3390/foods8030102>
- ResearchGate. (2019). Design and Performance Test of Ohmic-Assisted Cocoa Fermentation Apparatus.https://www.researchgate.net/publication/333386948_Design_and_performance_test_of_ohmic-assisted_cocoa_fermentation_apparatus
- Rivera Fernández, Rubén & Gallo, Freddy & Guzmán Cedeño, Angel & Galeas, Mayra & Quinteros, Hugo & Ferrín, Lola & Barrera-Álvarez, Alexandra & Nivelá, Pedro. (2013). Efecto del Tipo y Tiempo de Fermentación en la Calidad Física y Química del Cacao (*Theobroma cacao* L.) TIPO NACIONAL. *Maderas: Ciencia y Tecnología*. 5. 7-12.
10.18779/cyt.v5i1.165.
- Termistor Sensor De Temperatura Ntc 10k. (S. F.). Mactronica.
<https://www.mactronica.com.co/termistor-sensor-de-temperatura-ntc-10k>
- Thilakarathne, Navod & Yassin, Hayati & Abu Bakar, Muhammad & Abas, Pg Emeroylariffion. (2021). Internet of Things in Smart Agriculture: Challenges, Opportunities and Future Directions. 1-9. 10.1109/CSDE53843.2021.9718402.
- Tovar Perilla, S. (2022). Electronic development of a cacao fermentation sensing system. Universidad de los Andes. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/64177>
- Vista de Tecnologías de IoT eficaces para una plataforma de agricultura 4.0. (s/f). Edu.co.
<https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ingeniare/article/view/8936/9014>