



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA
AUTOMÁTICA TOSTADORA DE CAFÉ QUE PERMITA EL
MONITOREO Y CONTROL A DISTANCIA UTILIZANDO IOT Y
UNA APLICACIÓN MÓVIL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: Adrián Joel Santana Cedeño
Alfredo José Veintimilla Castillo
TUTOR: Gabriel Santiago García Vásquez

Guayaquil - Ecuador
2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Adrián Joel Santana Cedeño** con documento de identificación N° **0931462477** y **Alfredo José Castillo Veintimilla** con documento de identificación N° **0929243459**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 18 de febrero del año 2026

Atentamente,



Adrián Joel Santana Cedeño
0931462477



Alfredo José Castillo Veintimilla
0929243459

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Adrián Joel Santana Cedeño** con documento de identificación N° **0931462477** y **Alfredo José Veintimilla Castillo** con documento de identificación N° **0929243459**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **Dispositivo Tecnológico: IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA AUTOMÁTICA TOSTADORA DE CAFÉ QUE PERMITA EL MONITOREO Y CONTROL A DISTANCIA UTILIZANDO IoT Y UNA APLICACIÓN MÓVIL**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 18 de febrero del año 2026

Atentamente,



Adrián Joel Santana Cedeño
0931462477



Alfredo José Veintimilla Castillo
0929243459

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Gabriel Santiago García Vásquez**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA AUTOMÁTICA TOSTADORA DE CAFÉ QUE PERMITA EL MONITOREO Y CONTROL A DISTANCIA UTILIZANDO IoT Y UNA APLICACIÓN MÓVIL**, realizado por **Adrián Joel Santana Cedeño** con documento de identificación N° **0931462477** y por **Alfredo José Veintimilla Castillo** con documento de identificación N° **0929243459**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 18 de febrero del año 2026

Atentamente,



Ing. Gabriel Santiago García Vásquez, Mg.
0920156500

DEDICATORIA

El presente proyecto de titulación está dedicado, ante todo, a mi familia, el pilar fundamental que ha sostenido cada uno de mis pasos. A mi padre, Orlando Santana, cuya guía y enseñanzas han sido la brújula en mi formación, sus consejos y compañía en este largo proceso han sido la base para iniciar y concluir este logro académico. También a mi abuela, Bella Molina, por ser mi figura materna, por su cuidado constante y por esa presencia protectora que ha sido mi refugio en todo momento, gracias a su sabiduría y ánimos de todos los días, ha sido el motor que me ha llevado a lograr mis metas.

De igual manera, dedico este fruto de mi esfuerzo a mis amigos, quienes con su lealtad y alegría transformaron los momentos más difíciles en impulsos para continuar y a mi compañera, por caminar a mi lado en este trayecto, compartiendo los desvelos y las metas, y por ser el apoyo fundamental que hizo posible alcanzar este sueño.

Adrian Joel Santana Cedeño

Dedico este proyecto de titulación, en primer lugar, a Dios, por bendecirme con la vida, por guiar mis pasos y permitirme superar cada dificultad presentada a lo largo de este proceso.

A mi madre, Dolores Castillo, por ser la persona que siempre está conmigo, por su amor incondicional y sus constantes palabras de aliento que me motivan a alcanzar cada uno de mis objetivos, por confiar en mí y ser el impulso que me anima a seguir adelante frente a cada desafío, y con el mismo sentimiento de gratitud y admiración, a mi padre, Alfredo Veintimilla Toala, por ser el ejemplo de hombre que aspiro llegar a ser, por su esfuerzo, dedicación y apoyo permanente en cada proyecto y en cada etapa de mi vida, siendo una inspiración fundamental en mi formación personal y profesional.

A su vez, a mis amigos y compañeros que me acompañaron durante este camino universitario, compartiendo conocimientos, experiencias, retos y logros.

Alfredo José Veintimilla Castillo

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, expreso mi gratitud a Dios por haberme bendecido con la vida, la salud y la fortaleza necesaria para superar los obstáculos y culminar con éxito esta etapa de mi formación. Agradezco mi familia, por su respaldo inquebrantable y por los valores que me han inculcado, me han hecho la persona que soy al día de hoy. Gracias por la paciencia, por el apoyo moral y económico que hizo posible mi formación académica.

A mi compañera, a quien agradezco profundamente por su presencia y su entrega. Gracias por ser el pilar que me sostuvo en los días de mayor presión, por su paciencia ante las horas de ausencia y por ser parte fundamental en la culminación de este sueño. A mis amigos y compañeros, que estuvieron en los momentos más adversos y siempre me han brindado de su apoyo, de su compañía y de sus consejos, los cuales fueron necesarios para seguir adelante hasta este punto de mi vida.

Finalmente, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a el Ing. Gabriel García, por su guía en este proyecto, por su exigencia, su orientación técnica y por la confianza depositada en este proyecto.

Adrian Joel Santana Cedeño

Quiero agradecer de manera especial a mis padres, por su amor, su esfuerzo y por estar siempre conmigo en cada etapa de mi vida, siendo el apoyo constante que me permitió alcanzar esta meta. A mis abuelos, por sus consejos y los valores que marcaron mi formación y que han guiado cada uno de mis pasos hasta este momento. También recuerdo con cariño a aquellos seres queridos que ya no están físicamente, pero que siguen presentes en mi corazón y en cada logro alcanzado.

De igual manera, agradezco a los trabajadores de la empresa Avdiesel por su disposición y acompañamiento durante el desarrollo de este proyecto, así como a nuestro tutor, el Ing. Gabriel García, por su guía, su exigencia y por la confianza depositada en la realización de este trabajo.

Alfredo José Veintimilla Castillo

RESUMEN

El presente proyecto de titulación tiene como objetivo el diseño, construcción e implementación de un prototipo de máquina tostadora de café automatizada de tipo tambor, diseñada específicamente para satisfacer las necesidades de pequeños y medianos productores. La propuesta surge como respuesta a la problemática recurrente de la falta de uniformidad en el tostado artesanal, donde los métodos manuales suelen generar inconsistencias que degradan parámetros críticos como el aroma, el sabor y la calidad final del grano. Para solucionar estas deficiencias, se han integrado herramientas de automatización y monitoreo remoto que permiten un control más preciso sobre las variables físicas del sistema, transformando un proceso inexacto en una línea controlada que mejora la calidad final del producto.

El núcleo del sistema desarrollado consiste en un tambor giratorio con una resistencia calefactora regulada mediante la programación y uso del método histerisismo para el control del encendido y apagado de la resistencia, esto se complementa con un sensor de temperatura de alta precisión mediante una termocupla tipo K. El movimiento rotacional es proporcionado por un motor DC acoplado, cuya velocidad se ajusta según la carga de grano introducida para garantizar una transferencia de calor homogénea. El ESP32 actúa como la unidad central de procesamiento que gestiona la lógica de control y actúa como puente de comunicación bajo arquitectura IoT. A través de la lógica de control implementada, el sistema responde de manera inmediata a las variaciones de temperatura dentro del tambor, manteniendo el set point configurado por el operario. Esta regulación automática elimina el error humano y la incertidumbre de los métodos tradicionales.

En cuanto a la infraestructura de software, se implementó un ecosistema de monitoreo basado en datos de series temporales, el sistema captura las variables en tiempo real y las guarda en una base de datos en InfluxDB, se utiliza Grafana como motor de visualización con características ampliadas para la supervisión analítica de los parámetros controlados. El proyecto cuenta además con una interfaz web personalizada que funciona como centro de mando para el operario; desde esta plataforma es posible seleccionar perfiles de tostado estándar como: claro, medio y oscuro, adaptados a las características específicas del grano a procesar, ayudando a que un operario no experimentado pueda hacer un buen acabado del producto con la mínima intervención posible.

El prototipo destaca por su capacidad de registro y almacenamiento de históricos, lo que facilita la trazabilidad de cada sesión de tostado y permite una optimización continua de los parámetros operativos basándose en datos reales. La validación del sistema se realizó mediante pruebas experimentales que se compararon con los niveles de tueste de la escala Agtron. Los resultados obtenidos en los ensayos muestran que el prototipo mantiene la temperatura del setpoint asignado y ofrece un cumplimiento objetivo de calidad que cumple con los estándares exigidos por la industria cafetalera actual.

Palabras claves: tostado de café, automatización, IoT, control térmico, ESP32, escala Agtron, InfluxDB, trazabilidad industrial.

ABSTRACT

This degree project focuses on the design, construction, and implementation of an automated drum-type coffee roasting machine prototype, specifically designed to meet the needs of small and medium-sized producers. The proposal arises as a response to the recurring problem of lack of uniformity in artisanal roasting, where manual methods often generate inconsistencies that degrade critical parameters such as aroma, flavor, and the final quality of the bean. To address these deficiencies, automation and remote monitoring tools have been integrated to allow more precise control over the physical variables of the system, transforming an inexact process into a controlled line that improves the final quality of the product.

The core of the developed system consists of a rotating drum with a heating element regulated through programming and the use of the hysteresis method for on-off control. This is complemented by a high-precision temperature sensor using a K-type thermocouple. Rotational movement is provided by a coupled DC motor, whose speed is adjusted according to the grain load introduced to ensure homogeneous heat transfer. The ESP32 acts as the central processing unit that manages the control logic and serves as a communication bridge under an IoT architecture. Through the implemented control logic, the system responds immediately to temperature variations within the drum, maintaining the setpoint configured by the operator. This automatic regulation eliminates human error and the uncertainty associated with traditional methods.

Regarding the software infrastructure, a monitoring ecosystem based on time-series data was implemented. The system captures variables in real time and stores them in an InfluxDB database, using Grafana as a visualization engine with enhanced features for the analytical supervision of the controlled parameters. Additionally, the project features a personalized web interface that functions as a command center for the operator. From this platform, it is possible to select standard roasting profiles—such as light, medium, and dark—adapted to the specific characteristics of the bean to be processed, helping an inexperienced operator achieve a high-quality finish with minimal intervention.

The prototype stands out for its ability to record and store historical data, facilitating the traceability of each roasting session and allowing for continuous optimization of operating parameters based on real data. System validation was performed through experimental tests compared against the roasting levels of the Agtron scale. The results obtained in the trials show that the prototype maintains the assigned setpoint temperature and offers objective quality compliance that meets the standards demanded by today's coffee industry.

Keywords: coffee roasting, automation, IoT, thermal control, ESP32, Agtron scale, InfluxDB, industrial traceability.

ÍNDICE GENERAL

I.	Problema	1
II.	Justificación	2
III.	Objetivos	3
III-A.	Objetivo general	3
III-B.	Objetivos específicos	3
IV.	Marco Teórico	4
IV-A.	Fundamentos del proceso de tostado del café	4
IV-A1.	Fruto del café	4
IV-A2.	Anatomía del fruto del café	4
IV-A3.	Grano de Café	4
IV-A4.	Anatomía del grano de Café	4
IV-B.	Tueste del grano de café	5
IV-B1.	Preparación del grano de café antes del tostado	5
IV-B2.	Tipos de tueste	6
IV-B3.	Escala de Agtron	6
IV-B4.	Principales fases del proceso de tostado	8
IV-B5.	Curva del tostado de café	9
IV-C.	Equipos de instrumentación y control	9
IV-C1.	Instrumentación para procesos térmicos	10
IV-C2.	Importancia de la medición de temperatura	10
IV-C3.	Errores de medición	10
IV-C4.	Calibración de instrumentos	10
IV-C5.	Resolución y precisión	10
IV-C6.	ESP32	11
IV-C7.	TERMOCUPLA TIPO K	11
IV-C8.	Driver para el sensor de temperatura MAX31855	12
IV-C9.	Motor DC	13
IV-C10.	Módulo controlador de motores BTS7960	13
IV-D.	Materiales mecánicos	14
IV-D1.	Acero Inoxidable 304	14
IV-D2.	Resistencia eléctrica	14
IV-D3.	Tornillos y Tuercas	15
IV-D4.	Torno y operaciones de mecanizado	15
IV-D5.	Fuente de poder 12v 5A	15
IV-D6.	Buck LM2596	16
IV-E.	Industria 4.0	16
IV-E1.	Tecnología de la información (IT)	17
IV-E2.	Tecnología operativa (OT)	17
IV-E3.	Convergencia IT-OT	17
IV-E4.	InfluxDB Datos de series temporales	18
IV-E5.	Grafana visualización de datos	18
IV-E6.	Pycharm	19
IV-E7.	Automatización	19
IV-E8.	Tostadora de café	19
IV-E9.	Tostadora de café automatizada	20
IV-F.	Arquitectura IoT	20

IV-F1.	IoT	20
IV-F2.	Plataforma Blynk	21
V.	Marco Metodológico	22
V-A.	Tipo y Enfoque de Investigación	22
V-A1.	Enfoque metodológico del desarrollo del prototipo	22
V-B.	Fase de Análisis	23
V-B1.	Selección del grano idóneo	23
V-B2.	Definición de requerimientos funcionales del sistema	23
V-B3.	Análisis de riesgo y restricciones	23
V-C.	Fase de Diseño	24
V-C1.	Diseño mecánico	24
V-C2.	Diseño Electrico - Electrónico	38
V-C3.	Diseño del sistema IoT y supervisión remota	40
V-C4.	Programación en Arduino IDE	43
V-C5.	Uso de pines virtuales y control del motor	45
V-C6.	Adquisición de temperatura con termocupla tipo K	46
V-C7.	Estructura del programa	46
V-C8.	Implementación de InfluxDB	47
V-C9.	Implementación del sistema de visualización y análisis mediante Grafana	48
V-C10.	Desarrollo de página web	48
V-C11.	Interfaz web: plantillas HTML con Jinja2 y Bootstrap	52
V-C12.	Publicación del servidor local mediante Ngrok	54
V-D.	Fase de Implementación	54
V-D1.	Selección del tipo de tostadora	54
V-D2.	Construcción y montaje	55
V-D3.	Comunicación IoT y supervisión remota	55
V-D4.	Gestión de estados y seguridad del sistema	55
V-E.	Condiciones de operación del prototipo	56
V-E1.	Criterios de Aceptación	56
V-F.	Fase de Validación	56
V-F1.	Enfoque de validación	56
V-F2.	Pruebas realizadas	56
V-F3.	Criterios de evaluación	57
V-F4.	Validación de la supervisión remota	57
VI.	Resultados	58
VI-A.	Piezas mecánicas del prototipo	58
VI-B.	Integración mecánica	58
VI-C.	Integración de componentes	61
VI-D.	Resultados del firmware	63
VI-E.	Integración Web	64
VI-E1.	Almacenamiento en InfluxDB	64
VI-E2.	Visualización y análisis en Grafana	64
VI-E3.	Desarrollo de la aplicación web en Flask	65
VI-F.	Pruebas experimentales del prototipo	66
VII.	Cronograma	69
VIII.	Presupuesto	70

IX. Conclusiones	71
X. Recomendaciones	72
Referencias	73

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Anatomía del fruto de café [19].	4
2.	Anatomía del grano de café [22].	5
3.	Café Verde [24].	6
4.	Tipos de tueste del café [28].	8
5.	Curva del tostado de café [30].	9
6.	ESP32 [30].	11
7.	Termocupla Tipo K [33].	12
8.	Sensor MAX31855 [35].	13
9.	Motor DC [37].	13
10.	Módulo controlador BTS7960 [38].	14
11.	Resistencias tubulares [40].	14
12.	Máquina Torno [43].	15
13.	Fuente de poder 12V 5A [45].	16
14.	Buck 5V [47].	16
15.	Convergencia de los mundos IT y OT[51].	18
16.	Entorno InfluxDB [52].	18
17.	Entorno Grafana [53].	19
18.	Tostadora de café con tambor [56].	20
19.	Plataforma IoT Blynk[60].	21
20.	Diagrama de flujo del proceso	22
21.	Mallado y convección, A. Santana y A. Veintimilla.	29
22.	Análisis térmico del tambor, A. Santana y A. Veintimilla.	30
23.	Tambor, A. Santana y A. Veintimilla.	31
24.	Acople de motor, A. Santana y A. Veintimilla.	31
25.	Acople de rulimán, A. Santana y A. Veintimilla.	32
26.	Cajeta de rulimán, A. Santana y A. Veintimilla.	32
27.	Rulimán, A. Santana y A. Veintimilla.	33
28.	Placa de fijación del motor, A. Santana y A. Veintimilla.	33
29.	Bastidor estructural, A. Santana y A. Veintimilla.	34
30.	Diseño ensamblado en Solidworks, A. Santana y A. Veintimilla.	34
31.	Plano de tambor giratorio hecho en SolidWorks, A. Santana y A. Veintimilla.	35
32.	Plano de tapa de motor, A. Santana y A. Veintimilla.	35
33.	Plano de tapa de rulimán, A. Santana y A. Veintimilla.	36
34.	Plano de placa de fijación del motor, A. Santana y A. Veintimilla.	36
35.	Plano de acople de motor, A. Santana y A. Veintimilla.	37
36.	Plano de acople de rulimán, A. Santana y A. Veintimilla.	37
37.	Plano de cajeta de rulimán, A. Santana y A. Veintimilla.	38
38.	Diagrama de componentes, A. Santana y A. Veintimilla.	39
39.	Arquitectura IoT + ESP32, A. Santana y A. Veintimilla.	40
40.	Plantilla inicial de trabajo, A. Santana y A. Veintimilla.	41
41.	DataStreams del proyecto	41
42.	Widgets de control y monitoreo	43
43.	Gestor de placas ESP32	44
44.	Configuración de las variables de monitorización	47
45.	Configuración del dashboard	48
46.	Programación en el entorno de desarrollo Pycharm	49
47.	Prueba de tostado con el prototipo, por A. Santana y A. Veintimilla.	57
48.	Operación de mecanizado en el torno, por A. Santana y A. Veintimilla.	58
49.	Operaciones de mecanizado al tambor, por A. Santana y A. Veintimilla.	59

50.	Piezas que conforman el tambor, por A. Santana y A. Veintimilla.	59
51.	Prototipo físico ensamblado, por A. Santana y A. Veintimilla.	61
52.	Prueba en conjunto mecánica/electrónica	62
53.	Ensamblado mecánico y electrónico, por A. Santana y A. Veintimilla.	62
54.	Puesta de equipos electrónicos, por A. Santana y A. Veintimilla.	63
55.	Dashboards con series temporales, por A. Santana y A. Veintimilla.	65
56.	Dashboards con Grafana, por A. Santana y A. Veintimilla.	65
57.	Interfaz web de inicio, por A. Santana y A. Veintimilla.	66
58.	Perfiles de tostado, por A. Santana y A. Veintimilla.	66
59.	Control interactivo con el prototipo, por A. Santana y A. Veintimilla.	67
60.	Tostado suave de almendra, A. Santana y A. Veintimilla.	67
61.	Prueba de tostado con cacao, A. Santana y A. Veintimilla.	68
62.	Cacao tostado, A. Santana y A. Veintimilla.	68
63.	Cronograma de actividades	69

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Clasificación del nivel de tueste según el valor Agtron	7
II.	Características de los termopares tipo K según TC-SA	12
III.	Tipos de tostadoras de café según Green Plantation	20
IV.	Asignación de pines del ESP32	39
V.	Datastreams y pines virtuales utilizados en la plataforma Blynk IoT	42
VI.	Variables principales del firmware	64
VII.	Presupuesto de materiales y costos del prototipo	70

I. PROBLEMA

A nivel mundial, uno de los productos agrícolas más populares en el mundo es el café, en 2024 se produjeron cerca de 11 millones de toneladas, mientras que el valor del mercado global alcanzó los 245 mil millones de USD [1]. América Latina y África concentran alrededor del 70 % de la producción, en gran parte a cargo de pequeños productores. En diversas regiones, el proceso de tostado del café aún se realiza de manera manual, lo cual genera variaciones notables en el producto final, como diferencias en el color, la textura y el nivel de tueste entre distintos lotes, además de la pérdida de compuestos esenciales para el aroma y el sabor del café [2].

El análisis realizado por Muluken et al. (2020) comparó el desempeño de métodos de tostado tradicionales e industriales. Los resultados evidencian que las técnicas manuales, como el tostado en sartén u horno, generan una mayor variabilidad en la humedad residual del grano, entre 1.32 % al 3.48 %. En cambio, los tostadores industriales de tambor y de lecho fluidizado presentan una mayor estabilidad en este parámetro [3].

Asimismo, las evaluaciones sensoriales (cupping scores) mostraron que los cafés procesados industrialmente obtuvieron mejores calificaciones en fragancia, sabor y balance, mientras que los tostados de forma manual presentaron los puntajes más bajos en limpieza de taza y uniformidad. Aunque no todas las diferencias fueron estadísticamente significativas, se identificó una tendencia clara: el método tradicional mostró de forma consistente un desempeño sensorial inferior frente a tecnologías más controladas. Esta falta de homogeneidad en el tostado manual repercute directamente en la calidad final del café, disminuyendo la capacidad de competir de los pequeños productores frente a quienes emplean procesos más tecnificados [4].

La falta de automatización en los procesos de tostado constituye una de las principales limitaciones para lograr uniformidad y estandarización, especialmente entre pequeños productores que dependen de métodos manuales. En contextos rurales, esta situación se ve agravada por la disponibilidad limitada de infraestructura tecnológica y por la dificultad de acceder a herramientas de control más avanzadas [5]. Aunque existen soluciones basadas en IoT capaces de supervisar y gestionar variables críticas en tiempo real, su adopción en el tostado de café continúa siendo reducida debido a la escasa capacitación técnica y al acceso limitado a tecnologías adecuadas [6]. Esta brecha tecnológica impide optimizar el proceso, incrementa la variabilidad entre lotes y afecta directamente la competitividad de los pequeños productores frente a sistemas más tecnificados [7].

En numerosos entornos agrícolas y de transformación primaria, las variables de temperatura y humedad no se monitorizan con precisión debido a la escasez de sensores accesibles o sistemas integrados. Aunque existen dispositivos capaces de proporcionar mediciones confiables, su implementación entre pequeños productores sigue siendo limitada, restringiendo oportunidades de mejora en calidad y rendimiento [8]. En el caso particular del tostado del café, la ausencia de un monitoreo continuo de parámetros críticos como la temperatura del tambor o las condiciones térmicas del proceso incrementa la probabilidad de defectos, pérdidas de aroma y variaciones no deseadas en el grado final de tueste. La falta de tecnologías accesibles y adaptadas al contexto rural impide alcanzar un control adecuado del proceso y limita el desarrollo productivo local [4].

II. JUSTIFICACIÓN

En Ecuador, la mayoría de los pequeños productores de café aún utilizan métodos manuales o equipos poco tecnificados durante el proceso de tostado [9]. De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), más del 90 % de los caficultores del país pertenecen a la agricultura familiar campesina, y enfrentan dificultades para acceder a infraestructura adecuada y tecnología de valor agregado, lo que reduce sus oportunidades de comercialización en segmentos de mayor precio [10].

El café en Ecuador es un pilar económico que emplea a más de 200,000 familias y genera alrededor de 230 millones de dólares anuales en exportaciones, con cerca de 1 millón de sacos exportados en 2021 [11]. Para mejorar la competitividad del sector, se han implementado innovaciones tecnológicas, como el diseño de una tostadora semiautomática con capacidad de 8 kg, que optimiza el proceso de tueste, aumentando la uniformidad y reduciendo el tiempo de producción, sin embargo los parámetros de tostado aun necesitan ser monitorizados por un operador en planta, con IoT se podría mantener un control en tiempo real remoto y reducir los errores manuales de calibración. [12].

La automatización del proceso de tostado presenta un impacto directo en la eficiencia y en la estandarización del producto final. Estudios recientes han demostrado que la incorporación de sistemas de control electrónico permite optimizar el rendimiento y reducir los tiempos operativos; por ejemplo, el diseño de una tostadora de 15 kg en Colombia logró disminuir el tiempo de tostado de 30 a 24 minutos mediante el uso de un sistema basado en Arduino, evidenciando incrementos significativos en consistencia y reducción de defectos del grano [13]. Para el contexto ecuatoriano, donde el café de especialidad puede alcanzar valores de hasta 3.000 USD por tonelada, frente a los 1.500 USD del café estándar, la capacidad de producir lotes homogéneos se convierte en un componente crítico para la competitividad de los pequeños productores [14]. La literatura señala además que los procesos automatizados contribuyen a disminuir pérdidas durante la producción y a mejorar la trazabilidad, factores clave para acceder a mercados de alto valor en Estados Unidos, Europa y Japón [15]. Desde esta perspectiva, el desarrollo de un prototipo automatizado no solo representa una mejora técnica, sino también una herramienta estratégica para fortalecer las capacidades productivas y económicas del sector cafetalero ecuatoriano.

La relevancia del monitoreo continuo de variables críticas del tostado se sustenta en evidencia técnica documentada en múltiples investigaciones. Contreras Duarte [16] demostró que la precisión en el control de temperatura puede reducir entre un 12 % y 18 % el consumo energético en procesos térmicos industriales, además de disminuir las pérdidas asociadas al sobrecalentamiento del producto. Asimismo, Castellanos Díaz [17] evidenció que la digitalización del monitoreo permite reducir hasta en un 25 % el desperdicio de materia prima, al evitar curvas térmicas inestables y ciclos de trabajo incorrectos. En el contexto ecuatoriano, Ayala Espinoza [18] señala que la incorporación de herramientas tecnológicas accesibles podría mejorar significativamente la calidad del café producido a pequeña escala, al posibilitar el registro y análisis de curvas de tueste, la repetibilidad entre lotes y la trazabilidad del proceso. En este sentido, la integración de plataformas IoT no solo facilita la obtención de datos en tiempo real, sino que fortalece la toma de decisiones basada en evidencia técnica, permitiendo alcanzar niveles de consistencia acordes a las exigencias de los mercados especializados.

III. OBJETIVOS

III-A. Objetivo general

Implementar un prototipo de máquina tostadora de café automática, que permita el monitoreo y control remoto en tiempo real de los parámetros del tostado mediante una aplicación móvil y tecnología IoT.

III-B. Objetivos específicos

- Implementar los componentes mecánicos y electrónicos para el tostado automático del café con una capacidad de 3Kg/h incorporando un control de temperatura.
- Desarrollar una aplicación móvil basada en IoT para monitoreo y control de temperatura en tiempo real mediante ESP32.
- Validar el funcionamiento de la máquina comparando el nivel de tueste con el rango de color establecido por la Asociación Nacional Ecuatoriana de Café, empleando la escala Agtron en un intervalo de 65 a 55 unidades.

IV. MARCO TEÓRICO

Este capítulo presenta los fundamentos teóricos que sustentan el desarrollo del proyecto, aborda los conceptos esenciales relacionados con el proceso del café, su anatomía, las etapas de tostado, así como los principios de automatización, mecánica y control aplicados al sistema propuesto. Esta sección permite al lector comprender el funcionamiento integral del sistema, sirve como base conceptual para el diseño e implementación del prototipo.

IV-A. Fundamentos del proceso de tostado del café

IV-A1. Fruto del café: El café se desarrolla dentro de un fruto conocido comúnmente como *cereza de café*, el cual presenta una estructura multicapa cuya función principal es proteger la semilla y permitir su desarrollo adecuado durante la maduración. Este fruto sufre diversas transformaciones durante los procesos de cosecha y beneficio, en los cuales sus capas externas son removidas de forma progresiva hasta obtener el grano verde destinado al tueste.

IV-A2. Anatomía del fruto del café: La cereza de café está compuesta por las siguientes capas externas:

- **Exocarpio (piel externa):** Capa externa de color rojo o amarillo según la variedad, responsable de proteger el fruto.
- **Mesocarpio (pulpa):** Tejido carnoso y azucarado que rodea la semilla, removido durante el despulpado.
- **Endocarpio (pergamino):** Capa dura y protectora que envuelve directamente a la semilla y es retirada durante el trillado.

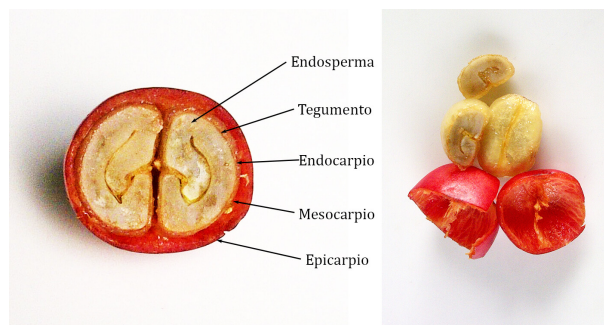


Figura 1. Anatomía del fruto de café [19].

IV-A3. Grano de Café: El grano de café es la semilla (endospermo) alojada en el interior de la cereza del café, recubierta por la película plateada, el pergamino y otras capas del fruto, y es justamente esta semilla la que luego será tostada para producir la bebida de café [20].

IV-A4. Anatomía del grano de Café: La semilla de café se compone de tres capas principales [21]:

- **Piel plateada (Silver Skin / Perisperm o Spermoderm):** Esta es la capa más externa que recubre directamente la semilla. A menudo permanece adherida al grano hasta el tueste.
- **Endospermo (Endosperm):** Constituye la mayor parte de la semilla. Es el tejido que rodea al embrión y contiene los nutrientes. Su composición química es clave para el aroma y sabor del café.

- **Embrión (Embryo):** Es la parte viva de la semilla, formada por un hipocótilo y dos cotiledones, con unos 3–4 mm de longitud.

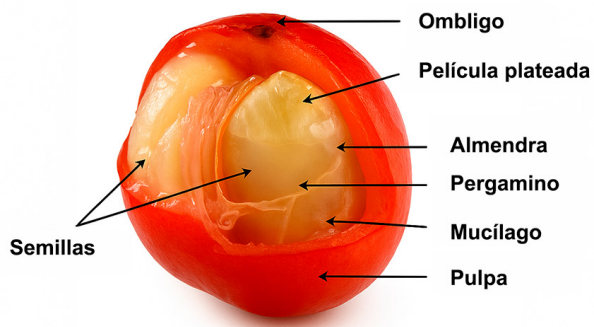


Figura 2. Anatomía del grano de café [22].

IV-B. Tueste del grano de café

El tueste del café consiste en aplicar calor a las semillas del café verde con el fin de obtener un grano más frágil y fácil de moler, que al infundirse en agua permita preparar la bebida de café. Los principales objetivos de este proceso son realzar los aromas y facilitar su solubilidad en agua. Al someter el grano a calor durante un tiempo determinado, se desencadena un proceso físico-químico que modifica sus propiedades y genera nuevos compuestos. Durante esta transformación, el grano pierde humedad, aumenta de tamaño y experimenta un cambio en su color [23].

IV-B1. Preparación del grano de café antes del tostado: Antes de proceder al tostado, es esencial que el café se encuentre en condiciones óptimas para garantizar un producto final de alta calidad. La materia prima debe ser de excelente calidad, idealmente proveniente de la cosecha más reciente, y contar con un contenido de humedad aproximado del 12 %, ya que esto influye directamente en la curva de tueste y en el rendimiento del grano durante el proceso. El café trillado debe estar previamente clasificado y completamente limpio, libre de cualquier impureza que pueda afectar la uniformidad del tostado o la calidad sensorial del producto final. Además, es importante conocer las características físicas del grano, como su densidad y tamaño, para anticipar cómo reaccionará al calor. Finalmente, se debe tener en cuenta el estilo de consumo y el tipo de preparación que se le dará al café, ya que esto ayudará a ajustar los parámetros del tostado de manera que se potencien los aromas y sabores deseados [23].



Figura 3. Café Verde [24].

IV-B2. Tipos de tueste: El grado de tueste del grano de café se considera un factor clave en la determinación del perfil sensorial y químico de la bebida final. Los tipos de tueste comunes se agrupan en claro, medio, medio-oscuro y oscuro, siendo el tueste claro aquel que presenta menor exposición al calor, y el oscuro el que alcanza un mayor desarrollo térmico. Durante el proceso de tostado, el grano pierde componentes ácidos, por lo que un tueste más ligero tendería a conservar mayor acidez (menor pH) en comparación con un tueste más intenso [25].

IV-B3. Escala de Agtron: La escala Agtron es un método estandarizado utilizado para la evaluación objetiva del nivel de tostado del café, basado en la medición óptica del color del grano tostado. Este sistema permite cuantificar el grado de tueste mediante valores numéricos obtenidos a partir de la reflectancia de la superficie del café, proporcionando resultados reproducibles y comparables entre distintos lotes y procesos de tostado.

El principio de funcionamiento de la escala Agtron se fundamenta en que, a medida que el café es sometido a mayores temperaturas y tiempos de exposición térmica, se producen reacciones químicas —principalmente reacciones de Maillard y procesos de caramelización— que generan el oscurecimiento progresivo del grano. Como consecuencia, la cantidad de luz reflejada disminuye, lo que se traduce en valores Agtron más bajos.

Existen dos modalidades principales de medición dentro del sistema Agtron: *Whole Bean* (WB), que evalúa el color del grano entero, y *Ground Coffee* (GC), que realiza la medición sobre café molido. La modalidad GC es ampliamente utilizada en entornos de investigación y control de calidad debido a su mayor precisión y menor variabilidad, al reducir la influencia de la textura superficial del grano.

La escala Agtron se expresa mediante valores numéricos inversamente proporcionales al grado de tostado. Valores elevados corresponden a tuestes claros, mientras que valores bajos indican tuestes oscuros. Esta clasificación permite establecer rangos de referencia para los distintos perfiles de tostado, facilitando la evaluación de la uniformidad y consistencia del proceso.

En el contexto del presente proyecto, la escala Agtron se emplea como criterio cuantitativo de validación del prototipo de tostadora automatizada. Los valores obtenidos permiten comparar el nivel de tostado alcanzado con

Tabla I
CLASIFICACIÓN DEL NIVEL DE TUESTE SEGÚN EL VALOR AGTRON

Valor Agtron	Nivel de tueste
95 – 85	Muy claro
84 – 75	Claro
74 – 65	Medio
64 – 55	Medio-oscuro
< 55	Oscuro

rangos estandarizados, verificando la efectividad del sistema de control térmico y la repetibilidad del proceso automatizado.

A continuación, se describen los principales tipos de café y sus particularidades.

- **Tueste claro (ligero):** También conocido como “primer crack”, se caracteriza por granos de color claro, secos y sin presencia de aceites. Su sabor es más ácido y brillante, con notas afrutadas y florales muy marcadas. Mantiene casi intactos los aromas originales del café y conserva un contenido alto de cafeína. Es ideal para quienes disfrutan un perfil suave, limpio y con gran expresión aromática. Este tueste resalta la procedencia del grano y las características del origen [26].
- **Tueste medio:** Presenta un color marrón medio y una textura seca al tacto. Ofrece un equilibrio entre dulzor, acidez y aroma, con un sabor más redondo y cuerpo moderado. El resultado es un café más equilibrado, con sabor y aroma más suaves que en el tueste claro. Mantiene la cafeína y realza las notas tostadas sin ocultar los sabores naturales del café. Es uno de los niveles más versátiles y populares por su equilibrio [26].
- **Tueste medio-oscuro:** El grano muestra un tono marrón profundo con una ligera capa de aceite en la superficie. La acidez disminuye notablemente, apareciendo sabores más ricos y notas de chocolate, caramelo y nuez. Tiene un cuerpo más denso y un toque agrídulce característico. Este tipo de tueste equilibra fuerza y suavidad, resultando ideal para quienes buscan sabor marcado sin llegar a la amargura del tueste oscuro [27].
- **Tueste oscuro:** El grano se deshidrata intensamente eliminando por completo sus aceites naturales. El resultado es un café con muy poca cafeína, ideal para preparaciones en cafetera espresso. Este tipo de tueste desarrolla sabores intensos con matices especiados y toques ahumados [27].



Figura 4. Tipos de tueste del café [28].

IV-B4. Principales fases del proceso de tostado: El tueste del café se realiza mediante un proceso organizado en varias etapas. En cada fase, el grano verde sufre transformaciones físicas y químicas que lo convierten en el café listo para preparar en infusión.

Las principales fases del tostado son:

- **Deshidratación o secado:** El café comienza a liberar humedad y el contenido de agua en los granos empieza a evaporarse. Esta pérdida de agua genera un aumento de la presión interna dentro del grano. Como resultado, el grano verde comienza a cambiar de color, adquiriendo un tono canela [27].
- **Caramelización:** En esta etapa, los compuestos de aroma y sabor del café continúan desarrollándose. Los azúcares presentes en el grano se funden a diferentes temperaturas (fructosa a 128°C; glucosa a 146–150°C; sacarosa a 186°C), lo que contribuye a preparar los compuestos necesarios para las reacciones de Maillard [23].
- **Transición térmica (crepitación o primer crack):** Durante esta fase, la presión interna de los granos aumenta significativamente, hasta romper las paredes celulares y casi duplicar su tamaño. Este fenómeno, conocido como primer crack, marca un punto crítico en el tueste y puede continuar o detenerse según el nivel de tostado deseado. Un incremento de temperatura lento y uniforme permite que los granos se agrieten de manera uniforme, evitando que se quemem [29].
- **Desarrollo del grano:** Después del primer crack, el tueste continúa hasta alcanzar el nivel deseado por el tostador. Durante esta etapa, el grano sigue experimentando cambios físicos: aumenta su porosidad y su color se oscurece. Es un momento clave en el que el tostador controla características como la acidez, el dulzor, el amargor y el tipo de tueste [29].

- **Segundo crack:** Esta fase ocurre únicamente cuando se busca un tueste más oscuro. La explosión del grano es menos intensa que en el primer crack, pero marca el inicio de un tueste profundo y más pronunciado en sabor y aroma [27].
- **Acabado y enfriamiento:** Para finalizar, el grano se enfría rápidamente, alcanzando menos de 175°C en aproximadamente 30 segundos. Luego continúa el enfriamiento hasta llegar a la temperatura ambiente en menos de tres minutos, asegurando la estabilidad del tueste y conservando sus características [23].

IV-B5. Curva del tostado de café: La curva de tostado del café es una representación gráfica que describe la evolución de la temperatura del grano en función del tiempo durante el proceso de tueste. Esta curva constituye una herramienta fundamental para el control y la repetibilidad del proceso, ya que permite analizar el comportamiento térmico del grano y ajustar los parámetros operativos del tostador con el fin de obtener un perfil sensorial específico.

El proceso de tostado se divide generalmente en varias etapas bien definidas, cada una caracterizada por fenómenos físicos y químicos particulares que influyen directamente en el desarrollo del aroma, sabor, cuerpo y color del café.

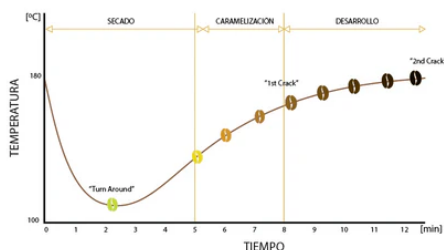


Figura 5. Curva del tostado de café [30].

IV-C. Equipos de instrumentación y control

La instrumentación constituye un elemento fundamental en los sistemas de automatización industrial porque permite la adquisición confiable de variables físicas del proceso para su posterior monitoreo, control y análisis. En el caso del proceso de tostado de café, la correcta medición de variables térmicas y mecánicas es crítica para garantizar la calidad, repetibilidad y seguridad del proceso.

A diferencia de un simple conjunto de componentes electrónicos, la instrumentación debe ser concebida como un sistema integrado que asegure precisión, estabilidad y robustez frente a las condiciones propias del entorno industrial, tales como altas temperaturas, vibraciones y variaciones eléctricas.

La instrumentación utilizada en el sistema desarrollado puede clasificarse en dos grandes grupos:

- Instrumentación para procesos térmicos.
- Instrumentación para accionamiento y control electromecánico.

Esta clasificación permite analizar cada subsistema desde una perspectiva funcional y metrológica, facilitando su correcta selección e integración.

IV-C1. Instrumentación para procesos térmicos: El proceso de tostado de café es esencialmente un proceso térmico, en el cual la temperatura del grano y su evolución en el tiempo determinan las características sensoriales del producto final. Por esta razón, la medición precisa y confiable de la temperatura constituye una de las variables más críticas del sistema.

IV-C2. Importancia de la medición de temperatura: La temperatura influye directamente en las reacciones físicas y químicas que ocurren durante el tostado, tales como la evaporación de humedad, las reacciones de Maillard y la caramelización de azúcares. Una medición inexacta puede conducir a perfiles de tueste inconsistentes, afectando negativamente la calidad del café y reduciendo la repetibilidad del proceso.

En sistemas automatizados, la señal de temperatura es además la variable de realimentación principal para los algoritmos de control, como el control proporcional–integral–derivativo (PID), por lo que su confiabilidad es esencial para la estabilidad del sistema.

IV-C3. Errores de medición: Toda medición está sujeta a errores, los cuales pueden clasificarse principalmente en errores sistemáticos y errores aleatorios. En la medición de temperatura durante el tostado de café, los errores más comunes incluyen:

- Errores por mala ubicación del sensor, que generan lecturas no representativas de la temperatura real del proceso.
- Errores por retardo térmico del sensor, especialmente relevantes en procesos con variaciones rápidas de temperatura.
- Interferencias eléctricas y ruido, que afectan la señal medida.

La identificación y mitigación de estos errores es un aspecto clave en el diseño de sistemas de instrumentación confiables.

IV-C4. Calibración de instrumentos: La calibración es el proceso mediante el cual se compara la medición de un instrumento con un patrón de referencia trazable, con el objetivo de determinar y corregir desviaciones. En aplicaciones térmicas, la calibración periódica de los sensores de temperatura permite garantizar la exactitud de las mediciones y mantener la coherencia del sistema a lo largo del tiempo.

En un sistema de tostado automatizado, una calibración adecuada contribuye a mejorar la repetibilidad de los perfiles de tueste y a reducir la variabilidad entre lotes.

IV-C5. Resolución y precisión: Es importante diferenciar entre resolución y precisión en los sistemas de medición. La resolución se refiere al cambio mínimo detectable por el instrumento, mientras que la precisión

indica qué tan cercana es la medición al valor real de la variable.

En procesos térmicos como el tostado de café, una alta resolución permite detectar pequeñas variaciones de temperatura, mientras que una alta precisión asegura que dichas variaciones reflejen el comportamiento real del proceso. Ambos parámetros deben ser considerados conjuntamente durante la selección de los sensores y módulos de adquisición.

IV-C6. ESP32: El ESP32 es un microcontrolador innovador que se ha vuelto esencial en la tecnología moderna. Es un sistema en chip (SoC) de bajo costo y bajo consumo, con conectividad Wi-Fi y Bluetooth. Se usa para una amplia gama de aplicaciones, desde sistemas de domótica hasta dispositivos médicos. Cuenta con facilidad de integración con otros dispositivos y su tamaño compacto lo convierte en un dispositivo fácil de implementar en proyectos con futura escalabilidad [31].

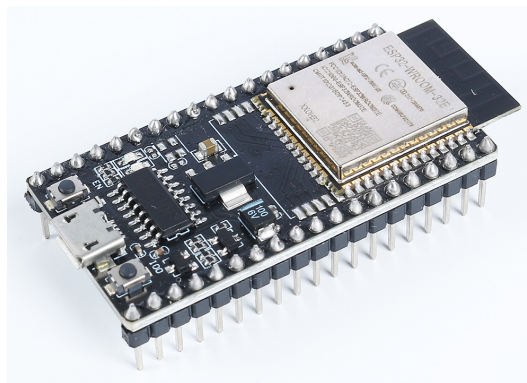


Figura 6. ESP32 [30].

IV-C7. TERMOCUPLA TIPO K: El termopar tipo K (aleación Cromel/Alumel) es el tipo de termopar más utilizado en aplicaciones industriales, diseñado principalmente para atmósferas neutras. Su rango de temperatura en servicio continuo se aproxima a los 1100 °C, alcanzando picos de hasta 1200 °C, aunque por encima de los 800 °C la oxidación puede provocar deriva y descalibración [32].

Tabla II
CARACTERÍSTICAS DE LOS TERMOPARES TIPO K SEGÚN TC-SA

Modelo / Tipo	Material del sensor	Rango de temperatura (°C)	Aplicaciones recomendadas
Tipo K estándar	Cromel / Alumel	0–1100 (hasta 1200 picos)	Uso general en atmósferas neutras o oxidantes
Tipo K con vaina metálica	Cromel / Alumel con vaina de acero inoxidable	–50–1100	Procesos industriales, hornos, reactores
Tipo K con aislamiento mineral	Cromel / Alumel (aislado con óxido de magnesio)	–200–1200	Medición precisa en entornos de alta temperatura y vibración
Tipo K miniatura	Cromel / Alumel	0–400	Equipos portátiles, experimentos de laboratorio
Tipo K con compensación	Cromel / Alumel con cable compensado	0–600	Extensión de señal y control de temperatura industrial

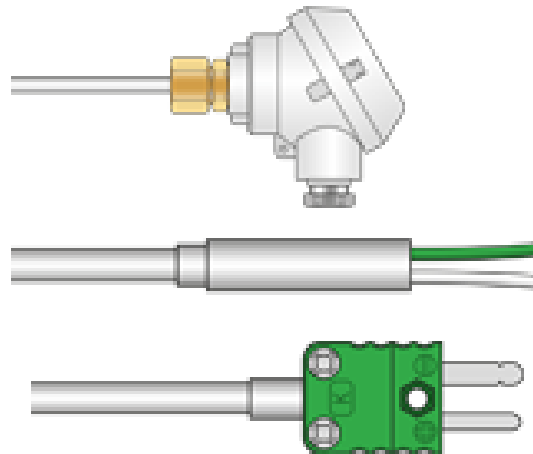


Figura 7. Termocupla Tipo K [33].

IV-C8. Driver para el sensor de temperatura MAX31855: El módulo MAX31855K es un convertidor digital de termopares (tipo K) con interfaz SPI de 14 bits que permite leer una amplia gama de temperaturas. El termopar tipo K se conecta a este módulo; el módulo digitaliza la señal de temperatura y la envía mediante interfaz SPI para que pueda ser leída por un microcontrolador.

Este módulo es compatible únicamente con termopares tipo K, opera a alimentación de 3.3 V y alcanza un rango de medición desde aproximadamente -200 °C hasta +1350 °C, con resolución de 0.25 °C [34].

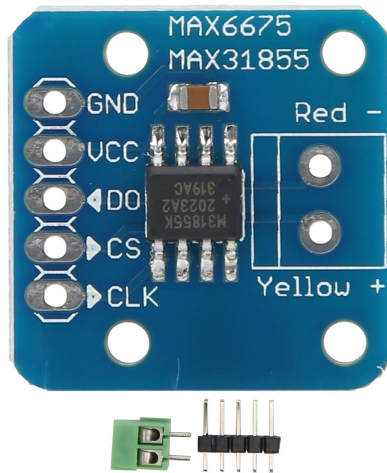


Figura 8. Sensor MAX31855 [35].

IV-C9. Motor DC: El motor DC, también llamado motor de corriente continua, es una máquina electromagnética cuyo objetivo es transformar energía eléctrica en energía mecánica. Se basa en fuerzas magnéticas y dispone de mecanismos internos electrónicos o electromecánicos; un componente característico de los motores DC convencionales es el conmutador, que invierte periódicamente el flujo de corriente dentro del motor [36].



Figura 9. Motor DC [37].

IV-C10. Módulo controlador de motores BTS7960 : El controlador de motores BTS7960 es un driver de potencia basado en un puente en "H" que regula la dirección y velocidad de motores DC; opera en un rango de 5.5 V a 27 V con una capacidad de corriente de hasta 43 A e integra un chip de aislamiento de protección ante sobretensiones y un disipador térmico para el manejo de altas cargas de trabajo. [38].

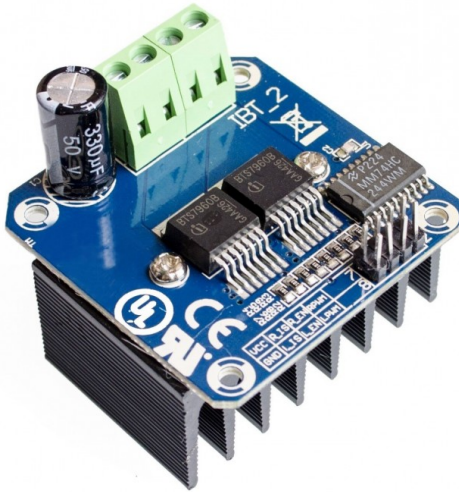


Figura 10. Módulo controlador BTS7960 [38].

IV-D. Materiales mecánicos

IV-D1. Acero Inoxidable 304: El acero inoxidable tipo 304 es una aleación austenítica de cromo-níquel que contiene al menos un 18 % de cromo y alrededor de un 8 % de níquel, con un máximo de 0,08 % de carbono. Esta combinación le otorga excelente soldabilidad, resistencia a la corrosión y tenacidad inclusive a bajas temperaturas. [39]

IV-D2. Resistencia eléctrica: Las resistencias destacan como los componentes más versátiles en sectores industriales y científicos debido a su capacidad para operar mediante radiación y convección, permitiendo su integración en moldes, placas fresadas o incluso la inmersión directa para el calentamiento de líquidos. La naturaleza robusta de su construcción asegura una resistencia superior ante condiciones críticas de trabajo, tales como choques mecánicos y ambientes corrosivos, permitiendo que el dispositivo sea moldeado en múltiples configuraciones geométricas y soldado a superficies de acero inoxidable para optimizar la conducción térmica en aplicaciones de alta exigencia. [40].



Figura 11. Resistencias tubulares [40].

IV-D3. Tornillos y Tuercas: Los tornillos son elementos de fijación mecánica utilizados para unir piezas ya sea de forma permanente o temporal; su diseño permite que, mediante la rosca y el apriete adecuados, generen la fuerza axial necesaria para mantener elementos ensamblados. Por su parte, las tuercas son piezas con un orificio roscado que facilitan el acople con un tornillo y permiten cerrar o asegurar la unión de dos componentes [41].

IV-D4. Torno y operaciones de mecanizado: Un torno es una máquina utilizada en procesos de manufactura para dar forma a piezas, principalmente metálicas, mediante la rotación del material sobre su propio eje mientras una herramienta de corte permanece fija o se desplaza de manera controlada. Este principio resulta especialmente adecuado para la fabricación de componentes cilíndricos o simétricos.

Entre las principales operaciones de mecanizado que se realizan en un torno se encuentran el torneado exterior, empleado para reducir el diámetro de una pieza; el mandrinado o torneado interior, para trabajar superficies internas; el refrentado, utilizado para mecanizar la cara frontal del material; y el roscado, que permite generar filetes internos o externos. También es posible ejecutar operaciones complementarias como taladrado, ranurado y acabados superficiales.[42].

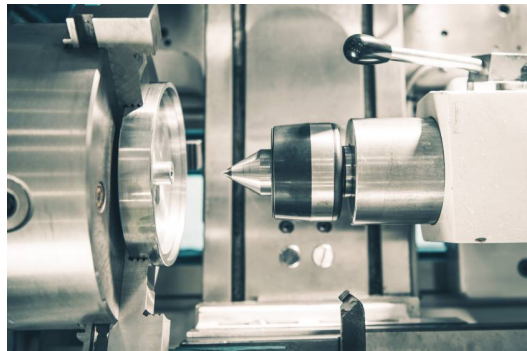


Figura 12. Máquina Torno [43].

IV-D5. Fuente de poder 12v 5A: Una fuente de poder de 12V 5A es un dispositivo electrónico diseñado para convertir la energía de la red eléctrica (110–220V en corriente alterna) en corriente continua estable de 12 voltios, con una capacidad máxima de 5 amperios (aproximadamente 60 W), permitiendo alimentar de forma segura y eficiente equipos como motores DC, cámaras, controladores, tiras LED y sistemas de automatización; esta fuente realiza los procesos de transformación, rectificación y regulación para reducir el voltaje de entrada, convertirlo de CA a CC y filtrar la señal para entregar una salida limpia y constante, y al ser de tipo conmutada, ofrece un diseño compacto, alta eficiencia y protecciones integradas contra sobrecarga, cortocircuito y sobretensión. [44].



Figura 13. Fuente de poder 12V 5A [45].

IV-D6. Buck LM2596: El LM2596 es un convertidor DC-DC reductor que sirve para disminuir un voltaje de entrada a uno menor y estable. Trabaja de forma conmutada, lo que le permite ser más eficiente que los reguladores lineales. Puede manejar corrientes de hasta 3 A y el voltaje de salida se ajusta con un potenciómetro. Se usa comúnmente para obtener voltajes bajos, como 5V o 3.3V, a partir de fuentes de mayor voltaje, por ejemplo 12V [46].

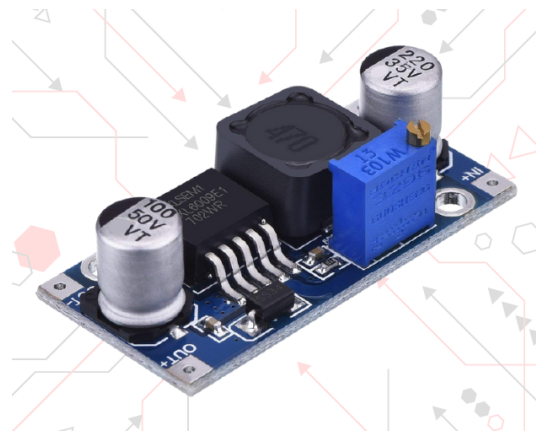


Figura 14. Buck 5V [47].

IV-E. Industria 4.0

La Industria 4.0 representa la cuarta revolución industrial y se caracteriza por la integración de tecnologías digitales avanzadas en los procesos productivos, tales como el Internet de las Cosas (IoT), la automatización inteligente, el análisis de datos y los sistemas ciberfísicos. Este enfoque permite la interconexión de máquinas, sensores y sistemas de control, facilitando la toma de decisiones en tiempo real y mejorando la eficiencia, flexibilidad y trazabilidad de los procesos industriales.

En el contexto de los procesos agroindustriales, como el tostado de café, la aplicación de los principios de la Industria 4.0 posibilita el monitoreo continuo de variables críticas, la recopilación y análisis de datos históricos y la implementación de estrategias de control automático. Estas capacidades contribuyen a la optimización del proceso, a la mejora de la calidad del producto final y a la reducción de la variabilidad, alineándose con las tendencias actuales de digitalización y automatización industrial.

IV-E1. Tecnología de la información (IT): La tecnología de la información (TI) es el proceso que engloba la creación, el almacenamiento, la transmisión y la recepción de la información, así como los métodos de aplicación de estos procesos. Aunque muchas personas equiparan este concepto exclusivamente a los ordenadores y redes informáticas, su alcance es mucho más amplio e integra hardware, software, herramientas organizativas y metodológicas para facilitar, gestionar y optimizar el flujo de información en múltiples contextos [48].

IV-E2. Tecnología operativa (OT): La seguridad de OT (Tecnología Operativa) se refiere al conjunto de prácticas, tecnologías y controles diseñados para proteger los sistemas que monitorean y controlan los procesos físicos en entornos industriales —como maquinaria, dispositivos de campo, redes de control y sistemas SCADA— frente a ataques, fallos o accesos no autorizados. Estos sistemas, cuya misión es garantizar la disponibilidad y correcto funcionamiento de equipos críticos, tradicionalmente operaban aislados de internet. Sin embargo, con la convergencia de redes TI y OT, ahora están expuestos a nuevas amenazas cibernéticas que pueden provocar interrupciones del servicio, daños físicos o riesgos para la seguridad de las personas. Esta realidad exige un enfoque específico de seguridad para OT, que incorpore visibilidad de activos, segmentación de red, análisis continuo de tráfico y administración de acceso [49].

IV-E3. Convergencia IT-OT: La convergencia IT/OT se define como la integración de los sistemas de gestión de datos (IT) con los sistemas de operación industrial (OT), permitiendo el intercambio de datos en tiempo real y potenciando tanto la eficiencia operativa como la rapidez en la toma de decisiones. Tradicionalmente, IT y OT funcionaban en silos separados las TI se centraban en el tratamiento y la protección de los datos, mientras que la tecnología operativa gestionaba procesos físicos, maquinaria y sistemas de control. Esta convergencia está impulsada por la transformación digital, el auge del Internet de las Cosas (IoT) y del Internet industrial de las cosas (IIoT), que permiten que los dispositivos físicos de OT transmitan datos directamente al mundo digital de IT. El resultado es una arquitectura más cohesiva, en la que los datos generados por procesos operativos pueden ser analizados por sistemas de información para optimizar mantenimiento, producción, logística y otros flujos. Sin embargo, esta unión también presenta retos, especialmente en materia de seguridad, gobernanza y compatibilidad tecnológica, ya que los entornos OT, diseñados para funcionar con alta disponibilidad y mínimas interrupciones, deben adaptarse a protocolos, infraestructuras y exigencias propias del dominio IT [50].

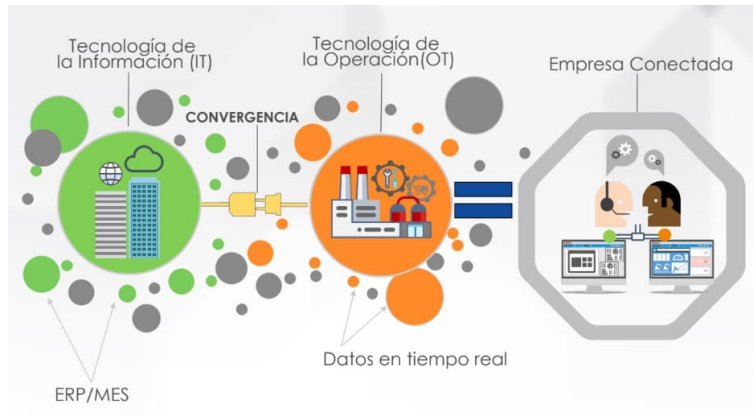


Figura 15. Convergencia de los mundos IT y OT[51].

IV-E4. InfluxDB Datos de series temporales: InfluxDB es una base de datos diseñada específicamente para almacenar, gestionar y consultar datos de series temporales, es decir, conjuntos de datos que se generan a lo largo del tiempo con marcas temporales asociadas. Este tipo de bases de datos es especialmente útil para registrar datos que provienen de sensores, métricas de sistemas, monitoreo de aplicaciones o flujos de información continua, ya que permite organizar y acceder rápidamente a valores históricos según su tiempo de generación [52].

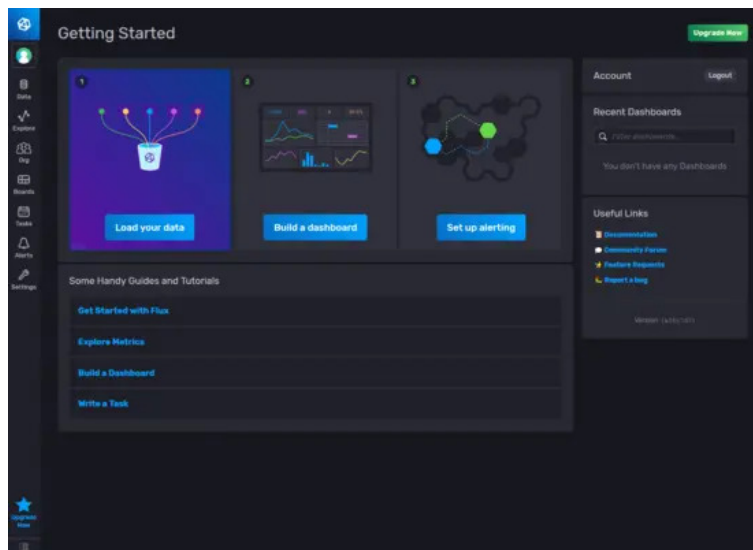


Figura 16. Entorno InfluxDB [52].

IV-E5. Grafana visualización de datos: Grafana es una plataforma de código abierto orientada a la visualización e interacción con datos y series temporales, esto lo hace a través de una interfaz web, permite crear cuadros de mando y gráficos que representan información recolectada de diferentes fuentes de datos, como InfluxDB, Prometheus, bases de datos SQL, esta herramienta facilita el análisis visual y la supervisión de tendencias y patrones en los datos [53].

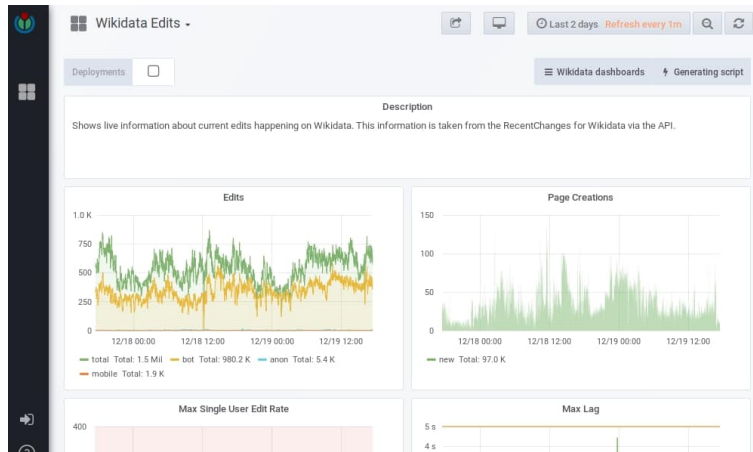


Figura 17. Entorno Grafana [53].

IV-E6. Pycharm: PyCharm es un entorno de desarrollo integrado IDE que se especializa en la programación con Python, desarrollado por la empresa JetBrains, ofrece una suite de herramientas para escribir, depurar, probar y mantener código de Python de manera eficiente. Entre sus capacidades se incluye: análisis inteligente de código, depurador gráfico, ejecución de pruebas unitarias y soporte para integración con sistemas de control de versiones, esto ayuda al desarrollo tanto de aplicaciones simples como de proyectos complejos [54].

IV-E7. Automatización: La automatización es el uso de tecnología para ejecutar tareas con menos intervención humana, permitiendo que procesos repetitivos o estructurados se realicen de forma consistente y eficiente. En entornos IT e industriales, esto implica la implementación de software, secuencias programadas, orquestación y flujos de trabajo que conectan infraestructura, aplicaciones, redes y servicios, con el objetivo de mejorar la productividad, reducir errores y acelerar la entrega de valor [55].

IV-E8. Tostadora de café: Una tostadora de café es un equipo diseñado para aplicar calor a los granos de café verde con el propósito de provocar las reacciones químicas (como Maillard) que transforman sus características físicas y organolépticas, desarrollando aroma, sabor, color y textura. El proceso se controla mediante diferentes métodos de transferencia térmica, conducción, convección o una combinación y puede variar en escala, tecnología y perfil de tueste según su aplicación [56].



Figura 18. Tostadora de café con tambor [56].

Tabla III
TIPOS DE TOSTADORAS DE CAFÉ SEGÚN GREEN PLANTATION

Tipo de tostadora	Principio de funcionamiento	Ventajas principales	Comentarios
Tostador de tambor (drum roaster)	Tambor metálico rotatorio que contiene los granos y se calienta externamente por gas u otra fuente de calor.	Ofrece buena versatilidad y control del perfil de tueste.	Puede generar tueste desigual si la mezcla interna no es homogénea.
Tostador de tambor de doble pared	Versión en la que la pared exterior del tambor no está en contacto directo con la fuente de calor.	Mejor uniformidad y menor riesgo de quemado.	Similar al tambor tradicional; requiere experiencia para operar correctamente.
Tostador de aire caliente / lecho fluido	Flujo de aire caliente que mantiene los granos en suspensión durante el tueste.	Alta uniformidad y eliminación eficiente de cascarilla.	Mayor coste inicial y necesidad de mantenimiento especializado.
Tostadora de muestras	Equipo de pequeña escala usado para pruebas y ajuste de perfiles de tueste.	Ideal para experimentación, formulación y control de calidad.	No apta para producción a gran escala debido a su baja capacidad.

IV-E9. Tostadora de café automatizada: Una máquina tostadora automática de café es un equipo altamente especializado que incorpora sensores, controles digitales y software avanzado para gestionar de forma precisa cada etapa del tueste: desde la carga y calentamiento de los granos verdes, pasando por los crujidos característicos del proceso, hasta el enfriamiento final. Gracias a esta automatización, se asegura consistencia, precisión, eficiencia energética y la capacidad de replicar perfiles de sabor de lote a lote con mínima intervención humana [57].

IV-F. Arquitectura IoT

IV-F1. IoT: El Internet de las Cosas (IoT) se refiere a la red de objetos físicos —como sensores, aparatos, vehículos o maquinaria— conectados a Internet mediante software, sensores u otras tecnologías, lo que les permite recopilar, intercambiar y analizar datos de forma autónoma. Esta interconexión va más allá de ordenadores o

teléfonos inteligentes, abarcando desde electrodomésticos hasta sistemas industriales, y permite el monitoreo remoto y el control en tiempo real, potenciando la automatización, la eficiencia operativa, la toma de decisiones basada en datos y la ampliación de la inteligencia en múltiples sectores [58].

IV-F2. Plataforma Blynk: La plataforma Blynk es un entorno de software de bajo código (low-code) diseñado para el desarrollo y despliegue rápido de soluciones de Internet de las Cosas (IoT). Permite conectar dispositivos físicos (sensores, actuadores, microcontroladores) a la nube, crear aplicaciones móviles y web personalizadas, gestionar flotas de dispositivos, visualizar datos en tiempo real e histórica, definir automatismos, y escalar proyectos desde prototipos hasta productos industriales. Ofrece soporte para múltiples hardware, conectividad WiFi, Ethernet, móviles, LoRaWAN, y facilita el aprovisionamiento de dispositivos, actualización remota de firmware (OTA) y control de usuarios [59].

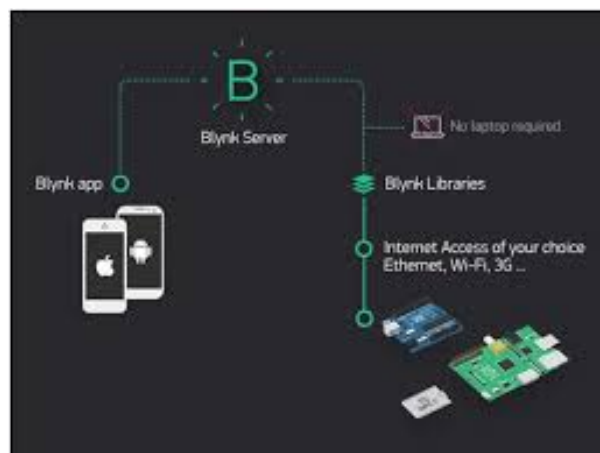


Figura 19. Plataforma IoT Blynk[60].

V. MARCO METODOLÓGICO

V-A. Tipo y Enfoque de Investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño experimental. Es aplicada porque desarrolla una solución tecnológica orientada a optimizar el proceso de tostado de café mediante automatización e integración IoT. Su enfoque es cuantitativo, dado que se emplean mediciones numéricas para caracterizar el comportamiento térmico y mecánico del proceso como: temperatura del tambor, velocidad de rotación y duración del tostado. Adicional, presenta un diseño experimental, ya que se manipulan variables operativas con el fin de analizar su impacto en la uniformidad del tueste, la estabilidad térmica y la eficiencia del sistema.

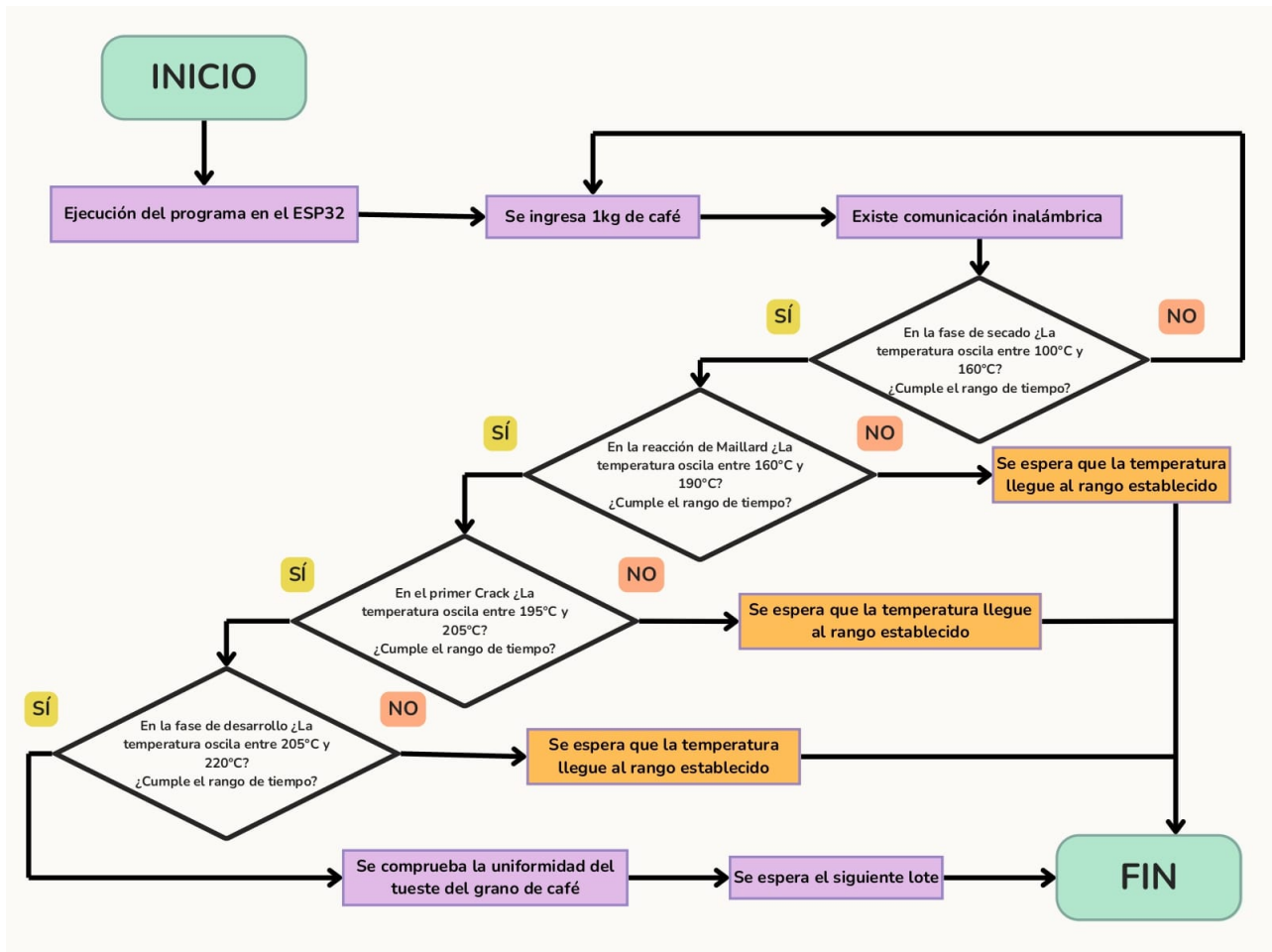


Figura 20. Diagrama de flujo del proceso

V-A1. *Enfoque metodológico del desarrollo del prototipo:* El desarrollo del prototipo se realizó siguiendo un enfoque metodológico iterativo y modular, típico de proyectos de ingeniería mecatrónica, en el cual cada fase alimenta a la siguiente. Este enfoque permitió identificar tempranamente limitaciones técnicas y realizar ajustes progresivos en el diseño, implementación y control del sistema.

V-B. Fase de Análisis

Se examinó el proceso productivo del café para determinar la etapa más adecuada de intervención tecnológica. El flujo general comprende: cultivo y recolección, beneficio (despulpado, fermentación y lavado), secado, trilla, clasificación y tostado. Entre estas etapas, el tostado se identificó como una fase crítica debido a que define el perfil sensorial del grano mediante transformaciones termoquímicas dependientes del control térmico y de la agitación.

V-B1. Selección del grano idóneo: Para mantener condiciones experimentales homogéneas, se seleccionó manualmente un conjunto de granos con características físicas similares, procurando uniformidad en tamaño y forma, descartando ejemplares con fisuras o restos de pergamino. Se emplearon granos provenientes de un mismo lote con el fin de reducir variaciones externas que pudieran afectar la repetibilidad de las pruebas.

Esta selección visual permitió asegurar que los cambios observados durante el tostado respondieran al desempeño del prototipo y no a irregularidades del material empleado. De esta manera, se estableció un punto de partida estable para el análisis del comportamiento térmico, la dinámica del tambor y la respuesta del sistema de control.

La selección del grano idóneo responde a la necesidad de garantizar condiciones experimentales repetibles. En estudios de procesos térmicos, la repetibilidad es un criterio fundamental para validar que los resultados obtenidos se deban al desempeño del sistema y no a variaciones inherentes del material procesado.

Al trabajar con granos de un mismo lote y con características físicas similares, se reduce la dispersión de resultados y se mejora la confiabilidad del análisis del comportamiento térmico y del sistema de control implementado.

A partir de este análisis, se definieron las variables relevantes para la operación del prototipo:

- **Temperatura del tambor (°C):** determina la curva térmica de tostado.
- **Velocidad de rotación (rpm):** influye en la mezcla y la transferencia de calor.
- **Tiempo de tostado (min):** delimita las fases de secado, pardeamiento y desarrollo.
- **Restricciones de diseño:** disponibilidad energética, seguridad eléctrica y térmica, costo y conectividad local.

V-B2. Definición de requerimientos funcionales del sistema: A partir del análisis del proceso, se establecieron los requerimientos funcionales del prototipo, entre los que se incluyen el rango de temperatura de operación, la capacidad de carga, la seguridad térmica y eléctrica, y la capacidad de monitoreo remoto mediante la aplicación con el protocolo IoT.

V-B3. Análisis de riesgo y restricciones: La incorrecta selección del grano de café fue considerada un factor de riesgo relevante durante la etapa de análisis, debido a su impacto directo en la estabilidad del proceso experimental. Se determinó que la incorporación de granos con defectos físicos, como granos negros, mohosos, partidos o agrios, así como aquellos con presencia de materia extraña (objetos no originarios del café), habría generado variaciones apreciables en la transferencia de calor y en la respuesta térmica durante el proceso de tostado. De igual forma, la posible contaminación originada por prácticas inadecuadas durante la cosecha, el secado o el almacenamiento pudo haber afectado tanto la calidad del producto final como la seguridad operativa del sistema. Estas condiciones

habrían introducido diferencias no controladas entre las muestras analizadas.

Bajo estas consideraciones, el análisis se extendió a las condiciones de operación del proceso de tostado, donde se centró en el control de la temperatura, la velocidad de rotación del tambor y el tiempo de proceso. Para la rotación del tambor se tomó como referencia un valor cercano a 10 rpm, al estar asociado con una distribución continua del grano durante el tostado. Variaciones respecto a este valor habrían alterado el desplazamiento de los granos dentro del tambor, modificando el tiempo de permanencia de estos en las zonas de mayor temperatura durante cada vuelta, dando lugar a diferencias en su exposición al calor, las cuales fueron consideradas dentro del análisis como posibles factores de variación en los resultados experimentales.

V-C. Fase de Diseño

La arquitectura del prototipo se estructuró en tres módulos principales: mecánico, electrónico y de control/IoT, lo que permitió organizar el desarrollo de manera ordenada y escalable.

V-C1. *Diseño mecánico* : Se diseñó un tambor metálico en el software CAD SolidWorks, se empleó un plano con las medidas del prototipo, el diseño se concibió bajo una estructura de acero que presenta un tambor rotatorio con aletas internas para favorecer la mezcla y uniformidad térmica. Este tambor es accionado por un motor mediante un sistema de transmisión adecuado al par requerido. La cámara de calentamiento incorpora aislamiento térmico y un alojamiento para la resistencia eléctrica, además de un puerto destinado a la sonda de temperatura. Con base en esta configuración, se generaron los planos mecánicos y la lista de materiales correspondiente.

Análisis Mecánico y Térmico del Sistema de Tostado

Capacidad máxima del tambor El tambor fue modelado geoméricamente como un cilindro de radio interno r y longitud L , cuyos valores fueron definidos previamente en el diseño CAD: $r = 0,07$ m y $L = 0,22$ m.

$$V = \pi r^2 L \quad (1)$$

Donde:

- V : Volumen interno del tambor (m^3).
- r : Radio interno del cilindro (m).
- L : Longitud del cilindro (m).

$$V = \pi(0,07)^2(0,22) = 0,0034 \text{ m}^3 \quad (2)$$

La masa máxima teórica de café, considerando una densidad aparente promedio de $\rho = 650 \text{ kg/m}^3$:

$$m = \rho V \quad (3)$$

Donde:

- m : Masa teórica máxima (kg).
- ρ : Densidad aparente del grano (kg/m^3).

$$m = (650)(0,0034) = 2,21 \text{ kg} \quad (4)$$

Determinación de la masa operativa mediante análisis dinámico

Se adopta como masa operativa nominal:

$$m = 0,5 \text{ kg.}$$

Momento de inercia de la carga: Modelando la carga de café como un cilindro macizo para efectos de inercia inicial:

$$I = \frac{1}{2}mr^2 \quad (5)$$

Donde:

- I : Momento de inercia ($kg \cdot m^2$).

$$I = \frac{1}{2}(0,5)(0,07)^2 = 0,001225 \text{ kg} \cdot m^2 \quad (6)$$

2.2 *Velocidad angular del sistema:*

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (7)$$

Donde:

- ω : Velocidad angular (rad/s).
- n : Velocidad de rotación (rpm).

Con $n = 80 \text{ rpm}$:

$$\omega = 8,38 \text{ rad/s} \quad (8)$$

2.3 *Aceleración angular:* Considerando un arranque en $t = 2 \text{ s}$:

$$\alpha = \frac{\omega}{t} \quad (9)$$

Donde:

- α : Aceleración angular (rad/s^2).

- t : Tiempo de arranque (s).

$$\alpha = \frac{8,38}{2} = 4,19 \text{ rad/s}^2 \quad (10)$$

Torque requerido para acelerar la carga:

$$T = I\alpha \quad (11)$$

Donde:

- T : Torque o par motor requerido ($N \cdot m$).

$$T = (0,001225)(4,19) = 0,00513 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (12)$$

Verificación Estructural del Eje

Para el cálculo de esfuerzos, se utiliza el torque nominal del motor $T = 0,00513 \text{ N} \cdot \text{m}$ y el nuevo diámetro de eje de $d = 0,008 \text{ m}$ (8mm).

Esfuerzo cortante máximo (τ_{max}): La fórmula para el esfuerzo cortante máximo en un eje macizo circular es:

$$\tau_{max} = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot d^3}$$

Donde:

- τ_{max} : Esfuerzo cortante máximo.
- T : Torque nominal.
- d : Diámetro del eje.

Sustituyendo los valores:

$$\tau_{max} = \frac{16 \cdot 0,00513}{\pi \cdot (0,008)^3}$$

$$\tau_{max} = \frac{0,08208}{\pi \cdot 0,00000512}$$

$$\tau_{max} = \frac{0,08208}{0,0000016085}$$

$$\tau_{max} \approx 51,029,06 \text{ Pa} \approx 0,051 \text{ MPa}$$

Esfuerzo equivalente de Von Mises (σ_{vm}): Para un estado de torsión pura:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{3} \cdot \tau_{max}$$

Donde:

- σ_{vm} : Esfuerzo equivalente de Von Mises.
- τ_{max} : Esfuerzo cortante máximo.

$$\sigma_{vm} = 1,732 \cdot 51,029,06$$

$$\sigma_{vm} = 88,382,33 Pa \approx 0,088 MPa$$

Factor de Seguridad (FS): Utilizando el límite elástico del acero inoxidable AISI 304 ($\sigma_y = 205 \cdot 10^6 Pa$):

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{vm}}$$

Donde:

- FS : Factor de seguridad.
- σ_y : Límite elástico del material.
- σ_{vm} : Esfuerzo de Von Mises.

$$FS = \frac{205,000,000}{88,382,33}$$

$$FS \approx 2,319,4$$

Análisis Térmico de Potencia y Eficiencia

Energía térmica requerida (Q): Para 0,5kg de café con un $\Delta T = 175K$:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Donde:

- Q : Energía térmica requerida.
- m : Masa del café.
- c : Calor específico del café.
- ΔT : Diferencial de temperatura.

$$Q = (0,5kg) \cdot (1600J/kg \cdot K) \cdot (175K)$$

$$Q = 140,000 J$$

Potencia real utilizada (P_{real}): Basado en un tiempo real de tostado de 9 minutos (540s):

$$P_{real} = \frac{Q}{t_{real}}$$

Donde:

- P_{real} : Potencia real utilizada.
- Q : Energía térmica.
- t_{real} : Tiempo real de tostado.

$$P_{real} = \frac{140,000J}{540s}$$

$$P_{real} = 259,26 W$$

Eficiencia térmica (η):

$$\eta = \frac{P_{real}}{P_{nominal}}$$

Donde:

- η : Eficiencia térmica.
- P_{real} : Potencia real.
- $P_{nominal}$: Potencia nominal del sistema.

$$\eta = \frac{259,26W}{1000W}$$

$$\eta = 0,2592 \approx 26\%$$

Mecanismos de Transferencia de Calor

Conducción térmica en la pared del tambor (\dot{Q}_{cond}): Utilizando la conductividad del AISI 304 ($k = 16,2 W/m \cdot K$), un área superficial de $0,0615m^2$ y un diferencial térmico supuesto de 50K a través del espesor de 2mm:

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{e}$$

Donde:

- \dot{Q}_{cond} : Tasa de transferencia de calor por conducción.
- k : Conductividad térmica.
- A : Área superficial.
- ΔT : Diferencial térmico.
- e : Espesor de la pared.

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{16,2 \cdot 0,0615 \cdot 50}{0,002}$$

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{49,815}{0,002}$$

$$\dot{Q}_{cond} = 24,907,5 W$$

Convección térmica hacia el ambiente (\dot{Q}_{conv}): Considerando el coeficiente de convección definido para la simulación ($h = 25 W/m^2 \cdot K$):

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

Donde:

- \dot{Q}_{conv} : Tasa de transferencia de calor por convección.
- h : Coeficiente de convección.
- A : Área superficial.
- T_s : Temperatura superficial.
- T_{∞} : Temperatura ambiente.

$$\dot{Q}_{conv} = 25 \cdot 0,0615 \cdot (200 - 25)$$

$$\dot{Q}_{conv} = 1,5375 \cdot 175$$

$$\dot{Q}_{conv} = 269,06 \text{ W}$$

Simulación de análisis térmico

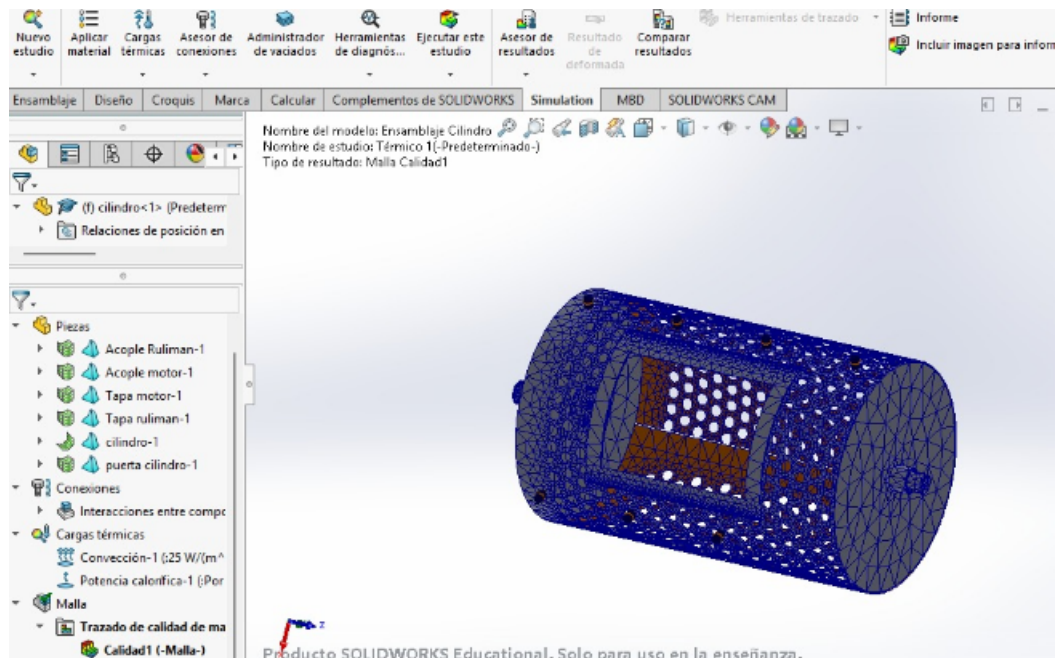


Figura 21. Mallado y convección, A. Santana y A. Veintimilla.

Según los resultados de la simulación, el modelo es totalmente coherente porque el calor fluye de manera lógica desde el pico de 3,442 K hasta los 1,183 K en las zonas de disipación, lo que nos confirma que el acero AISI 304 está gestionando la energía exactamente como dicta la física bajo las condiciones de conducción y convección ($h = 25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) que se aplicó.

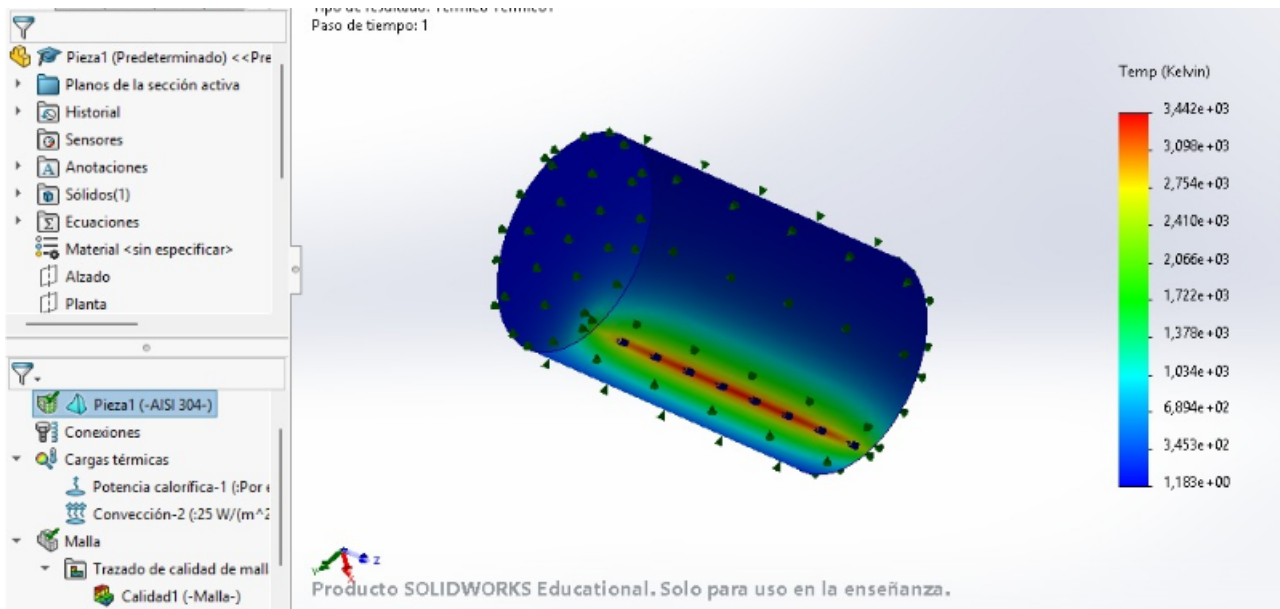


Figura 22. Análisis térmico del tambor, A. Santana y A. Veintimilla.

Selección del material

Se tomó la decisión de emplear acero inoxidable AISI 304 como material principal en la fabricación de la estructura del prototipo de la tostadora de café, considerando que presenta propiedades mecánicas y térmicas adecuadas para las condiciones de operación, además de una elevada resistencia a la corrosión generada por la exposición a la humedad, residuos del grano y ciclos térmicos propios del proceso de tostado, lo que permite su uso seguro en componentes en contacto directo con el café y facilita las labores de limpieza y mantenimiento.

Esta selección se fundamenta en la necesidad de garantizar un adecuado control del proceso y la aplicación de buenas prácticas de manufactura, en concordancia con los lineamientos de la norma ISO 9001:2015, contribuyendo a la reducción de riesgos de contaminación y asegurando la calidad e inocuidad del producto final.

Piezas mecánicas

Tambor: Este tambor constituye el elemento donde se realiza el proceso de tostado del café, ya que gira de forma continua permitiendo el contacto uniforme del grano con el calor, está fabricado en acero inoxidable perforado, lo que favorece la circulación del aire y la transferencia térmica, en su interior incorpora dos aletas internas de 2 mm × 9 mm, cuya función es remover el café durante la rotación para evitar acumulaciones y asegurar un tostado homogéneo, además el tambor cuenta con una puerta de descarga para la salida del café tostado de 100 mm × 70 mm. Dimensiones del tambor: Ø140 mm; L = 220 mm.

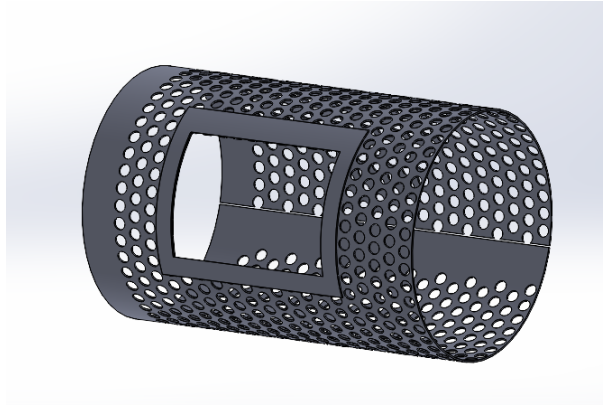


Figura 23. Tambor, A. Santana y A. Veintimilla.

Acople para el motor: Este acople tiene la función de transmitir el movimiento del eje del motor al cilindro del sistema, el motor cuenta con un eje de salida de 8 mm de diámetro, el cual se ajusta al diámetro interior del acople, de esta manera el acople se monta directamente sobre el eje del motor y en su extremo opuesto se encuentra soldado a la tapa lateral del cilindro.

Las dimensiones generales del acople son las siguientes: $\varnothing 25,7$ mm (unión a tapa del cilindro); $\varnothing 14$ mm (exterior lado motor); $\varnothing 8$ mm (alojamiento eje motor); $L = 56,7$ mm.

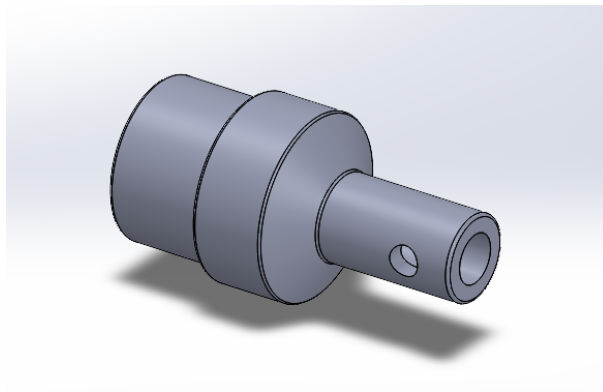


Figura 24. Acople de motor, A. Santana y A. Veintimilla.

Acople de rulimán: Se diseñó un acople de rulimán para mejorar el movimiento del tambor, ya que reduce la fricción y permite un giro más suave y estable. La parte que va soldada a la tapa del tambor tiene un diámetro exterior de 13,5 mm y un diámetro interior de 5,4 mm, mientras que la parte donde se acopla el rulimán tiene un diámetro exterior de 12 mm y un diámetro interior de 5 mm, ajustándose al diámetro interno del rulimán sumando una longitud total de 30 mm a la pieza.

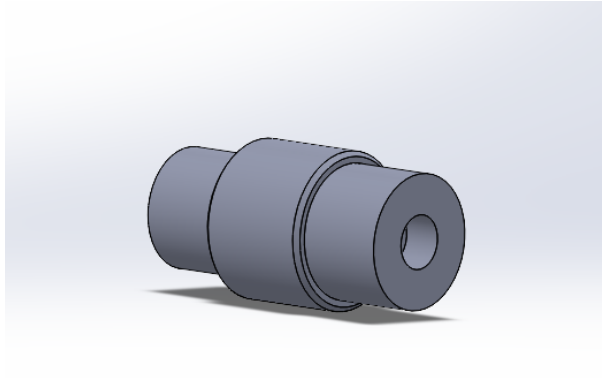


Figura 25. Acople de rulimán, A. Santana y A. Veintimilla.

Cajeta de rulimán: Su función es de alojar y posicionar el rodamiento para garantizar un movimiento suave y estable. Se diseñó un primer tramo con diámetro exterior de 49,7 mm, diámetro interior de 21,6 mm y una longitud de 6 mm, el cual sirvió como base de apoyo y fijación dentro del conjunto. El segundo tramo se destinó al acople del rulimán, con un diámetro exterior de 36 mm, un diámetro interior de 26 mm (correspondiente al diámetro exterior del rulimán) y una longitud de 9 mm, actuando como alojamiento y tope del rodamiento.

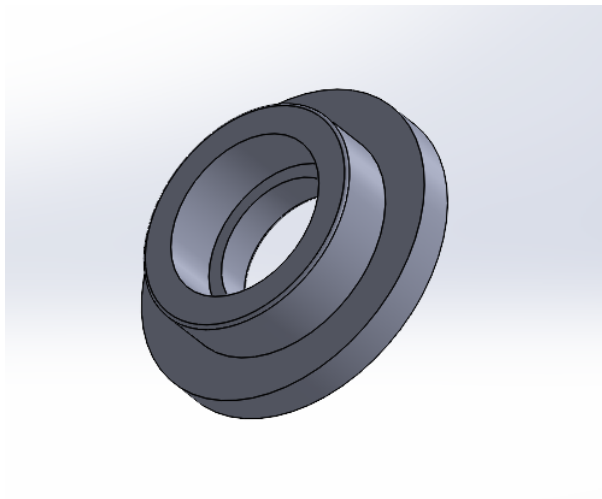


Figura 26. Cajeta de rulimán, A. Santana y A. Veintimilla.

Rulimán: El rulimán reduce la fricción y permite el giro suave del eje dentro del prototipo, lo que garantiza un movimiento estable y eficiente durante su funcionamiento, además de asegurar la correcta transmisión del movimiento y evitar el desgaste por fricción de las piezas en contacto. El rulimán utilizado tuvo unas dimensiones de $26 \times 12 \times 8$ mm, correspondientes al diámetro exterior, diámetro interior y longitud, respectivamente.

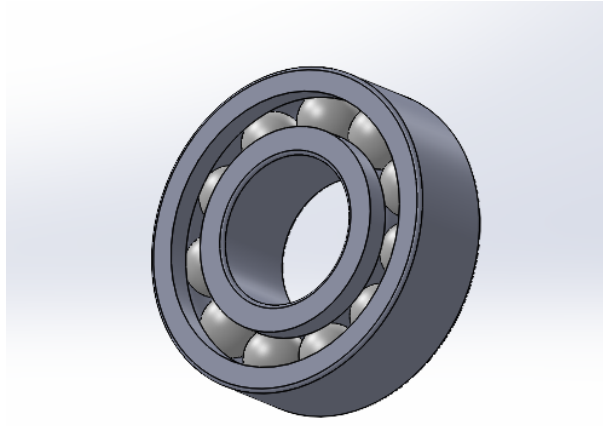


Figura 27. Rulimán, A. Santana y A. Veintimilla.

Placa de fijación del motor: Esta placa es la base para la fijación del motor, ya que permite sujetarlo firmemente a la estructura y mantener alineado el eje. La placa cuenta con cuatro perforaciones para empernar el motor y un orificio adicional por donde pasa el eje de salida.

Dimensiones: 100 mm × 66,70 mm; espesor 3 mm; 4 × Ø10 mm (perforaciones de fijación); Ø13 mm (salida del eje del motor).

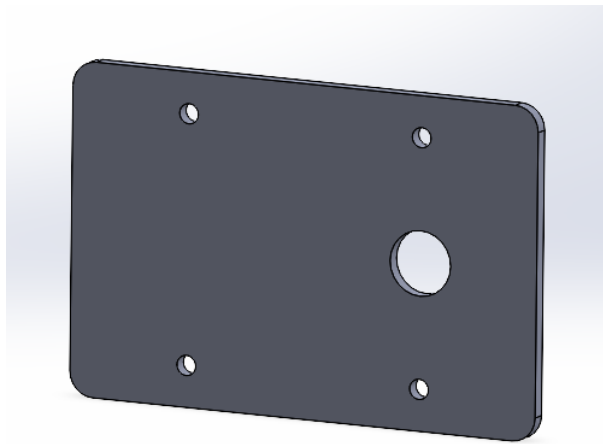


Figura 28. Placa de fijación del motor, A. Santana y A. Veintimilla.

Bastidor estructural: Básicamente es la pieza que sostiene el tambor junto con los acoples y sirve como soporte del conjunto durante el funcionamiento, está fabricado con varilla de acero doblada (Ø6,5 mm) para darle la forma necesaria.

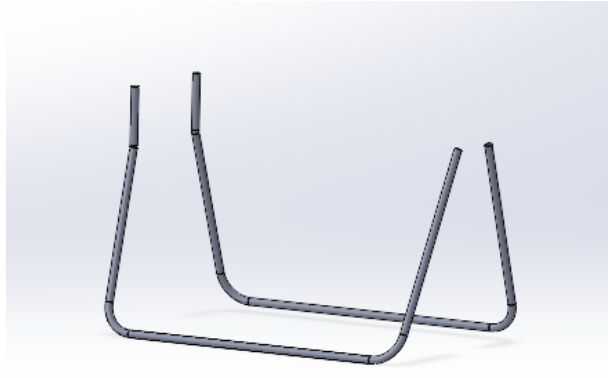


Figura 29. Bastidor estructural, A. Santana y A. Veintimilla.

Diseño ensamblado de la tostadora de café

La arquitectura de la tostadora de café se basa principalmente en el uso de acero inoxidable 304 de grado alimenticio, empleando soldadura en la fabricación de su estructura de soporte y acoples con el fin de asegurar una base firme y duradera; de igual manera, el motor y el tambor se fijan mediante el uso de pernos, lo que garantiza que ambos elementos sean desmontables para optimizar las labores de limpieza o permitir el cambio de piezas específicas.

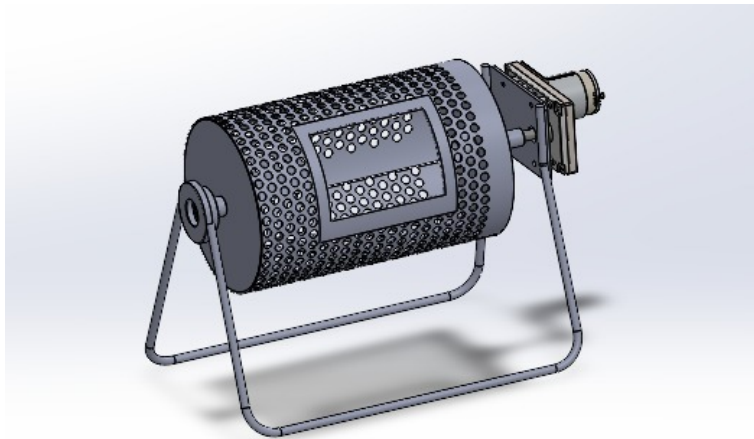


Figura 30. Diseño ensamblado en Solidworks, A. Santana y A. Veintimilla.

Planos de las piezas

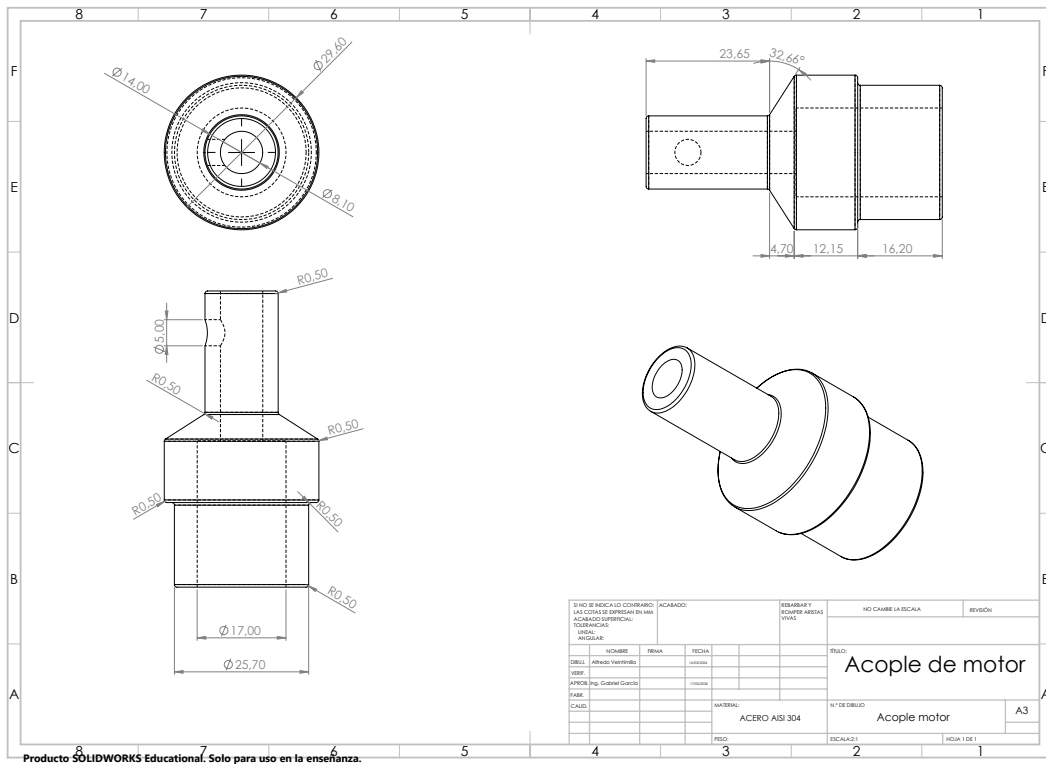


Figura 35. Plano de acople de motor, A. Santana y A. Veintimilla.

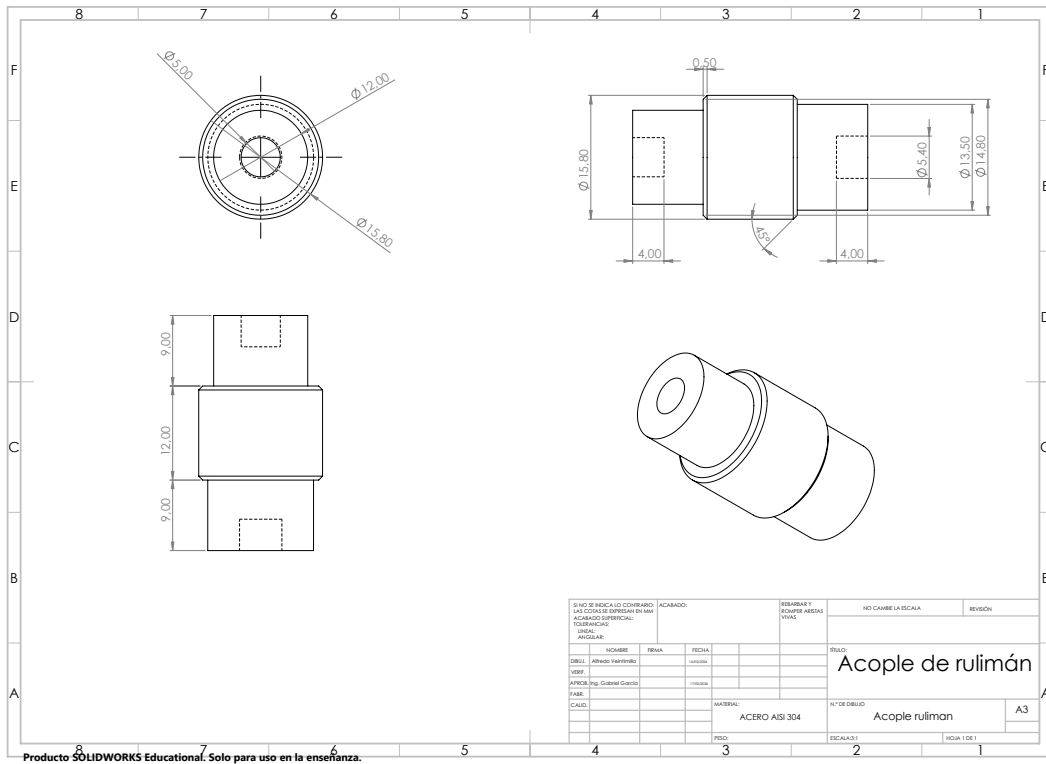


Figura 36. Plano de acople de rulimán, A. Santana y A. Veintimilla.

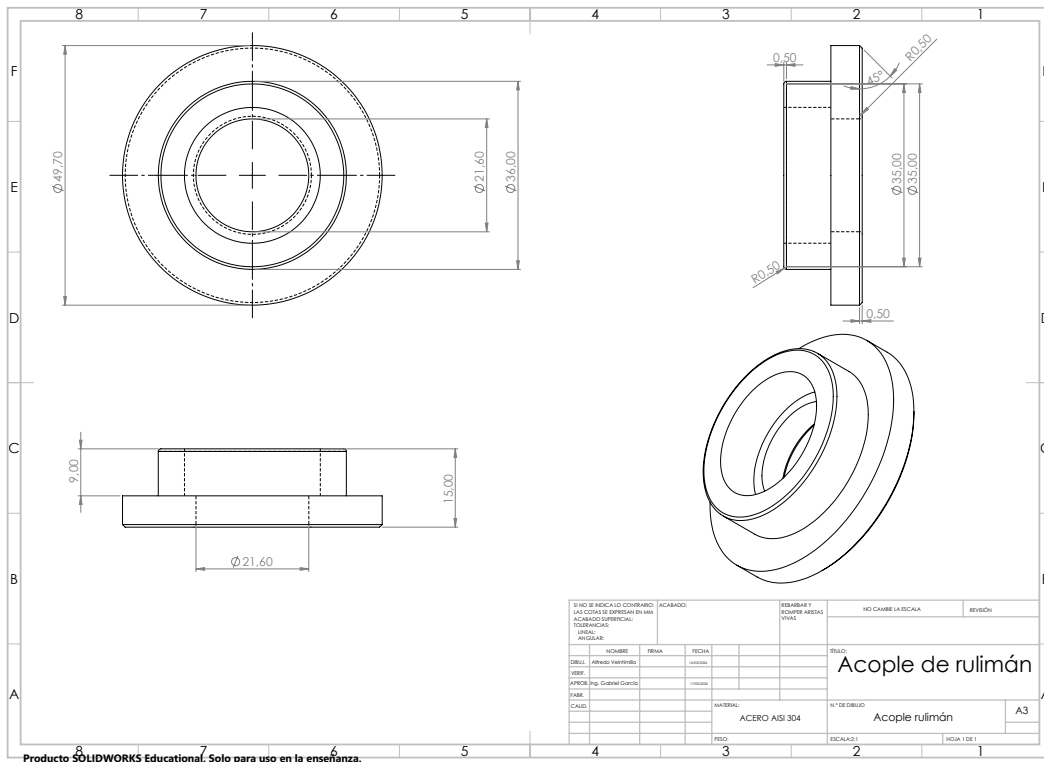


Figura 37. Plano de cajeta de rulimán, A. Santana y A. Veintimilla.

V-C2. *Diseño Electrico - Electrónico:* El diseño eléctrico y electrónico del prototipo se desarrolló a partir de las necesidades de adquisición, procesamiento y transmisión de datos generados durante el proceso de tostado del café, se diseño de esta manera para garantizar tanto un funcionamiento confiable del sistema como la correcta interacción entre los sensores, actuadores y plataformas de monitoreo utilizadas.

Para cumplir con estos requerimientos se seleccionó como unidad central de control el microcontrolador ESP32, debido a su adecuada capacidad de procesamiento y a la integración nativa de conectividad Wi-Fi, lo que permitió la transmisión de datos en tiempo real hacia plataformas externas de monitoreo y almacenamiento, el ESP32 ofrece compatibilidad con distintos protocolos de comunicación y cuenta con salidas digitales capaces de generar señales mediante modulación por ancho de pulso (PWM), necesarias para el control de los actuadores del sistema.

EL controlador centralizo las tareas de tostado del café permitiendo la coordinación entre los distintos elementos del sistema, como por ejemplo el control del motor encargado de la rotación del tambor, mediante el driver BTS7960 el cual recibe las órdenes de encendido y apagado directamente desde el microcontrolador ESP32 y las transmite al motor DC.

La velocidad de rotación del motor fue controlada mediante señales de modulación por ancho de pulso, lo que permite ajustar el movimiento del tambor en función de las condiciones de operación del proceso.

Se implementó un sistema de sensado orientado a la adquisición de las variables críticas del proceso, siendo la temperatura el principal parámetro de interés para la evaluación y control del tostado del café.

El sistema de sensado se formo a partir del control de estas variables:

- Temperatura:** se empleó una termocupla tipo K acoplada al módulo MAX31855 para acondicionar la señal y sea interpretada correctamente por el controlador, esto permite medir el rango térmico presente en el tambor de tostado, debido a su capacidad para operar a altas temperaturas, su estabilidad y su compatibilidad con el microcontrolador ESP32 facilito la adquisición precisa de la variable térmica durante el proceso de tostado.

La información de temperatura obtenida es procesada por el controlador central y utilizada para la toma de decisiones de control.

El sistema eléctrico incorpora un relé de estado sólido, el cual permite controlar el suministro de energía hacia la resistencia calefactora del prototipo. Este dispositivo opera con una señal de control en el rango de 3 a 24 VDC y conmuta una señal de potencia de 120 VAC, garantizando el aislamiento eléctrico entre el circuito de control y el circuito de potencia.

La activación del relé se realiza mediante una señal digital generada por el microcontrolador ESP32, a través de los pines destinados al control del sistema térmico, esta configuración permite regular el encendido y apagado de la resistencia calefactora de forma segura y confiable, acorde a las condiciones de operación del proceso de tostado.

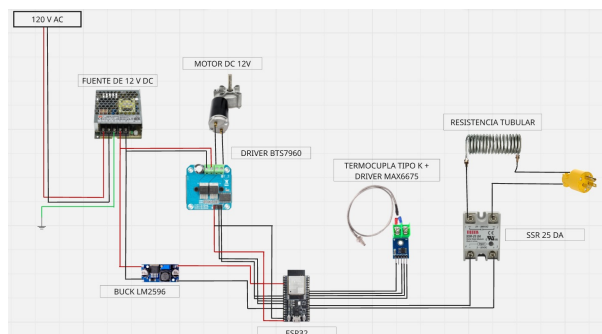


Figura 38. Diagrama de componentes, A. Santana y A. Veintimilla.

Tabla IV
ASIGNACIÓN DE PINES DEL ESP32

Componente	Pin ESP32	Función
MAX6675 SCK	GPIO 18	Reloj SPI
MAX6675 SO	GPIO 19	Datos SPI
MAX6675 CS	GPIO 5	Selección SPI
BTS7960 RPWM	GPIO 25	PWM Motor
BTS7960 LPWM	GPIO 26	PWM Motor
BTS7960 REN	GPIO 27	Habilitación
BTS7960 LEN	GPIO 14	Habilitación
SSR	GPIO 23	Control resistencia

V-C3. *Diseño del sistema IoT y supervisión remota:* El diseño del sistema IoT se orientó a la supervisión, control y registro de las variables críticas del proceso de tostado, permitiendo la interacción remota con el prototipo y el análisis del comportamiento del sistema en tiempo real, además de incluir una base de datos para la trazabilidad de los usuarios, de los recursos usados y las acciones realizadas en determinado tiempo.

Para ello, se estableció una arquitectura de comunicación entre el controlador central, los dispositivos de campo: sensores y actuadores, y las plataformas de visualización y control remoto.

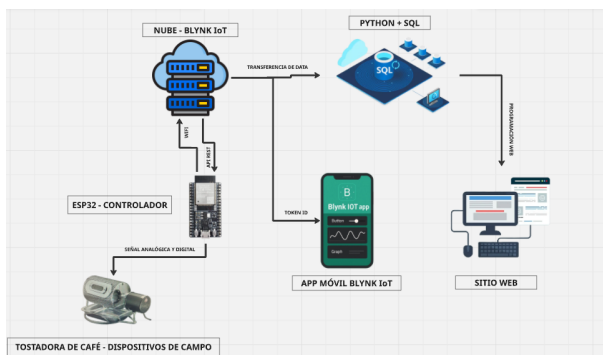


Figura 39. Arquitectura IoT + EPS32, A. Santana y A. Veintimilla.

El microcontrolador ESP32 actúa como el núcleo del sistema IoT, siendo responsable de la adquisición de datos provenientes de los sensores, el procesamiento de la información y la ejecución de las acciones de control sobre los actuadores. El ESP32 gestiona la comunicación inalámbrica mediante Wi-Fi, enviando los datos del proceso hacia el servidor en nube BLYNK y plataformas externas para su supervisión, recibiendo comandos remotos que modifican el comportamiento del sistema.

Los sensores permiten la medición continua de las variables del proceso, principalmente la temperatura del tambor y la velocidad de rotación, mientras que los actuadores, como la resistencia calefactora y el sistema de accionamiento del motor, ejecutan las acciones determinadas por el algoritmo de control.

Para la implementación de la plataforma Blynk IoT se realizó, en primer lugar, la creación de una plantilla inicial dentro del entorno de desarrollo de la plataforma, se definió la estructura base del proyecto, estableciendo el tipo de controlador utilizado y el método de comunicación empleado para el intercambio de información entre el prototipo y la aplicación de monitoreo.

Dentro de la configuración de la plantilla se seleccionó el microcontrolador ESP32 como dispositivo principal, debido a su compatibilidad nativa con la plataforma Blynk y a su capacidad de comunicación inalámbrica. En cuanto al medio de transmisión de datos se definió la conexión mediante red Wi-Fi, aprovechando el módulo integrado del ESP32, lo que permite el envío y la recepción de información en tiempo real sin necesidad de hardware adicional.

Figura 40. Plantilla inicial de trabajo, A. Santana y A. Veintimilla.

Como parte de la configuración de la plataforma Blynk IoT, fue necesario definir los DataStreams que serían utilizados para el intercambio de información entre el prototipo y la aplicación de monitoreo. Estos DataStreams constituyen el elemento fundamental para el manejo de los pines virtuales, los cuales permiten separar las señales físicas del microcontrolador y facilitar su gestión dentro del entorno IoT.

Cada DataStream fue asociado a un pin virtual específico definiendo el tipo de variable sea entera o con decimal para la representación de los datos, lo cual es utilizado por el firmware del ESP32 para enviar o recibir información relacionada con las variables del proceso. Esto permite sensar los datos obtenidos durante la operación del prototipo y transmitirlos de manera estructurada hacia la plataforma.

Figura 41. DataStreams del proyecto

Los valores adquiridos a través de los pines virtuales son posteriormente utilizados por las herramientas de visualización de la aplicación, lo que posibilita el monitoreo en tiempo real de las variables del sistema, así como su registro para análisis y seguimiento del desempeño del proceso de tostado.

Para la representación visual de la información y el control de las variables que interactúan con el proceso físico de tostado, se utilizaron widgets dentro de la plataforma Blynk IoT. Estos elementos gráficos establecieron una interfaz de usuario que facilita tanto el monitoreo en tiempo real como la interacción directa con el prototipo. Cada widget fue vinculado al pin virtual previamente definido en los DataStreams:

Tabla V
 DATASTREAMS Y PINES VIRTUALES UTILIZADOS EN LA PLATAFORMA BLYNK IOT

Variable	Pin virtual	Tipo de dato	Unidad	Función dentro del sistema
Temperatura	V0	Double	°C	Monitoreo en tiempo real de la temperatura del tambor durante el proceso de tostado.
Motor	V1	Entero	RPM	Control de encendido y apagado del motor encargado de la rotación del tambor.
Resistencia	V2	Entero	ON-OFF	Activación y desactivación del sistema de calentamiento mediante el relé de estado sólido.
Setpoint de temperatura	V3	Entero	°C	Definición de la temperatura objetivo utilizada como referencia para el control térmico.
Mensajes	V4	Cadena	–	Visualización de estados, alertas y mensajes informativos del sistema.
Velocidad del motor	V5	Entero	%	Ajuste de la velocidad de rotación del motor mediante modulación PWM.

Esto permite asociar las variables del proceso con su correspondiente representación en la aplicación. Los valores enviados desde el microcontrolador ESP32 se visualizan en forma de indicadores, gráficas o valores numéricos. Mientras que las acciones realizadas por el usuario a través de la interfaz se traducen en señales de control hacia el sistema físico.

Los widgets como los de tipo tabla o rango están destinados al monitoreo debido a que permiten visualizar parámetros como la temperatura del tambor durante el proceso de tostado, facilitando el seguimiento del comportamiento térmico del sistema. Los widgets de control como los de tipo switch o botón permiten al usuario interactuar con el prototipo, enviando órdenes como el encendido o apagado de actuadores y la modificación de variables de operación, las cuales son procesadas por el ESP32 para ejecutar las acciones correspondientes.

La plataforma Blynk gestiona la comunicación entre los widgets y el microcontrolador mediante la infraestructura de la nube propia de la plataforma que asegura la sincronización de los datos en tiempo real.

Este mecanismo permite que los cambios realizados en la aplicación se reflejen de manera inmediata en el proceso físico, y que la información generada por el prototipo sea actualizada continuamente en la interfaz de usuario.

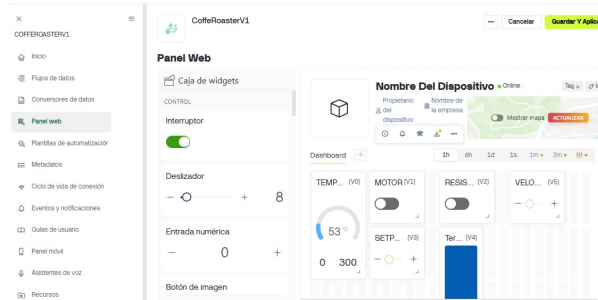


Figura 42. Widgets de control y monitoreo

La comunicación entre el prototipo y la plataforma Blynk IoT se estableció mediante el uso de un token de autenticación, el cual permite identificar de forma única al dispositivo y garantizar una conexión segura con la aplicación. Este mecanismo habilita el intercambio bidireccional de información, facilitando tanto el envío de datos desde el sistema físico hacia la interfaz de usuario como la recepción de comandos desde la aplicación.

La plataforma Blynk fue empleada como medio principal de interacción con el prototipo, permitiendo al usuario modificar parámetros operativos y ejecutar acciones sobre el sistema durante el proceso de tostado.

V-C4. Programación en Arduino IDE: Las interacciones son gestionadas por el microcontrolador ESP32 a través del firmware, el cual se encarga de interpretar los datos recibidos, procesar las variables del sistema y generar las señales de control, la programación del ESP32 se realizó utilizando el entorno de desarrollo Arduino, donde se implementaron las rutinas necesarias para la adquisición de datos, la comunicación con la plataforma IoT y el control de los actuadores del prototipo.

Para que el entorno de programación Arduino permitiera conectarse a la placa ESP32, fue necesario gestionar el paquete de placas ESP by Espressif Systems, este core permite programar el microcontrolador ESP32 en C/C++ e incluye:

- Control WiFi nativo.
- Manejo de GPIO digitales.
- Generación de PWM por hardware mediante el periférico LEDC.

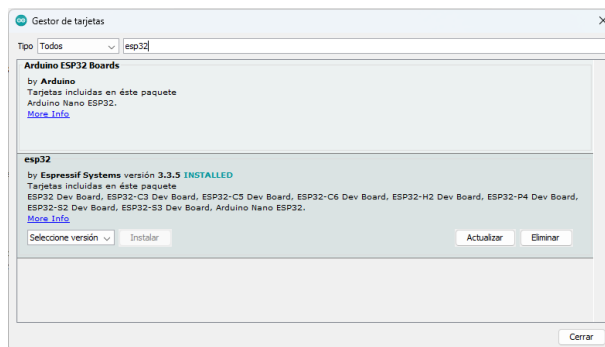


Figura 43. Gestor de placas ESP32

Para el desarrollo del firmware se hizo uso de las siguientes librerías:

- **WiFi.h:** Librería nativa del ESP32 utilizada para establecer la conexión a la red inalámbrica, permitiendo el acceso a Internet y la comunicación con servicios en la nube.
- **BlynkSimpleEsp32.h:** Librería oficial de la plataforma Blynk para ESP32, permite la comunicación bidireccional con el servidor Blynk Cloud, el manejo de pines virtuales, la recepción de comandos desde la aplicación móvil y el envío de variables de proceso.
- **SPI.h:** Librería para la comunicación mediante el protocolo SPI. Se utiliza como base para la interacción con el módulo convertidor de termocupa MAX6675.
- **max6675.h:** Librería específica para la lectura de temperatura a partir de una termocupa tipo K mediante el módulo MAX6675, entregando la medición directamente en grados Celsius.

```

1 /BLYNK (Firmware en Arduino IDE) /
2 #define BLYNK_TEMPLATE_ID    "TMPL2-ov0bJX"
3 #define BLYNK_TEMPLATE_NAME  "CoffeRoasterV1"
4 #define BLYNK_AUTH_TOKEN     "nouv_mHXonRV4UifPeNPFYahpi4A0irh"
5
6 /***** WiFi *****/
7 char ssid[] = "Infinix NOTE 12";
8 char pass[] = "infinix123_rt";
9
10 #include <WiFi.h>
11 #include <BlynkSimpleEsp32.h>
12 #include <SPI.h>
13 #include <max6675.h>
14
15 BlynkTimer timer;

```

Listing 1. Definición del Template, token de autenticación y librerías empleadas

Blynk genera tokens de autenticación del dispositivo, los cuales permiten vincular el firmware creado en Ardiono del ESP32 con el Template previamente creado en la consola de Blynk.

La conexión a la red WiFi se realiza mediante el uso del SSID y la contraseña configurados en el código, tras lo cual el dispositivo se autentica automáticamente en el servidor Blynk.

V-C5. Uso de pines virtuales y control del motor: La comunicación entre el ESP32 y la aplicación Blynk se realiza mediante pines virtuales, los cuales permiten desacoplar la interfaz gráfica del hardware físico.

```
1 #define VP_MOTOR_ONOFF      V1  // Switch MOTOR
2 #define VP_MOTOR_SPEED     V5  // Slider VELOCIDAD
3
4 #define VP_TEMP_GAUGE      V0  // Gauge TEMPERATURA
5 #define VP_SETPOINT_TEMP  V3  // Setpoint (futuro control)
6 #define VP_RESIST_ONOFF   V4  // Switch RESISTENCIA
```

Listing 2. Asignación de pines virtuales utilizados en la comunicación con Blynk

El motor del tambor es controlado a través de un driver BTS7960, utilizando dos pines digitales para definir el sentido de giro y un pin adicional para la señal PWM de velocidad. El ESP32 genera la señal PWM mediante el periférico LEDC, configurado con una frecuencia de 20 kHz y una resolución de 10 bits, lo cual permite un control preciso de la velocidad y reduce el ruido audible del motor.

```
1 const int PIN_RPWM = 25;
2 const int PIN_LPWM = 26;
3 const int PIN_REN  = 27;
4 const int PIN_LEN  = 14;
5
6 const int PWM_FREQ = 20000;
7 const int PWM_RES  = 10;  // 0..1023
```

Listing 3. Configuración de pines del BTS7960

Se implementó una función dedicada que centraliza la lógica de control del motor, haciendo que el sistema arranque en un estado seguro y que los cambios de velocidad y encendido se apliquen de forma controlada.

```
1 void applyMotor()
2 {
3   if (!motorEnabled || speedPercent <= 0) {
4     digitalWrite(PIN_INA, LOW);
5     digitalWrite(PIN_INB, LOW);
6     ledcWrite(PIN_ENA, 0);
7     return;
8   }
9
10  digitalWrite(PIN_INA, HIGH);
11  digitalWrite(PIN_INB, LOW);
12
```

```

13  int duty = map(speedPercent, 0, 100, 0, 1023);
14  ledcWrite(PIN_ENA, duty);
15  }

```

Listing 4. Función de control del motor con estado seguro y PWM

V-C6. Adquisición de temperatura con termocupla tipo K: La medición de temperatura se realiza mediante una termocupla tipo K conectada al módulo MAX6675. El ESP32 obtiene la lectura en grados Celsius y realiza una validación básica de los datos para detectar posibles fallos, como desconexión de la termocupla o lecturas fuera de rango.

```

1  const int PIN_MAX_SCK = 18;
2  const int PIN_MAX_SO  = 19;
3  const int PIN_MAX_CS  = 5;
4
5  MAX6675 tc(PIN_MAX_SCK, PIN_MAX_CS, PIN_MAX_SO);
6
7  void readAndSendTemp()
8  {
9      float t = tc.readCelsius();
10
11     if (isnan(t) || t < -10 || t > 1100) {
12         Blynk.virtualWrite(VP_TEMP_GAUGE, -1);
13         return;
14     }
15
16     Blynk.virtualWrite(VP_TEMP_GAUGE, t);
17 }

```

Listing 5. Inicialización del módulo MAX6675 y lectura de temperatura

Cuando el dato es obtenido, el valor de temperatura es enviado al servidor Blynk Cloud utilizando un pin virtual, permitiendo su visualización en tiempo real desde la aplicación móvil.

V-C7. Estructura del programa: El programa se organiza de forma no bloqueante utilizando un temporizador basado en BlynkTimer, el cual permite ejecutar tareas periódicas como la lectura de sensores y la impresión de información de depuración sin interrumpir la comunicación con la nube.

```

1  void setup()
2  {
3      Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN, ssid, pass);
4
5      timer.setInterval(1000L, readAndSendTemp);
6  }
7
8  void loop()

```

```

9 {
10   Blynk.run();
11   timer.run();
12 }

```

Listing 6. Estructura no bloqueante del firmware mediante BlynkTimer

La función `setup()` se encarga de inicializar los periféricos, establecer la conexión WiFi y autenticar el dispositivo en Blynk Cloud, mientras que la función `loop()` mantiene activa la comunicación con el servidor y ejecuta las tareas programadas.

Esta estructura garantiza un funcionamiento estable del sistema y una comunicación continua entre el ESP32, la plataforma IoT y la interfaz de usuario.

V-C8. *Implementación de InfluxDB*: Se implementó también un sistema de almacenamiento en la nube utilizando InfluxDB Cloud 2.0, una base de datos orientada a series temporales optimizada para el registro de datos cronológicos.

Se configuró una organización y un bucket específico denominado *Tostadora*, dentro del cual se almacenan las mediciones generadas por el prototipo. La comunicación entre el microcontrolador ESP32 y la base de datos se realizó mediante protocolo HTTPS utilizando autenticación basada en token y certificado TLS, garantizando la seguridad en la transmisión de la información.

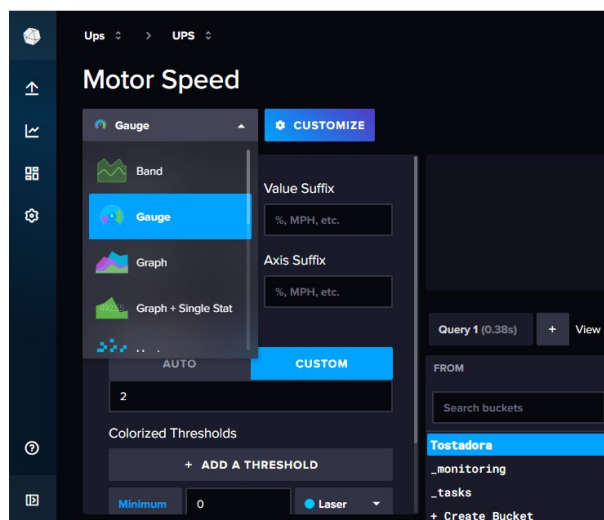


Figura 44. Configuración de las variables de monitorización

Para el envío de datos se utilizó la clase `Point`, definiendo una medición denominada *roaster_data*, en la cual se registran campos como temperatura filtrada, temperatura cruda, setpoint, velocidad del motor, estado del motor y estado del sistema de calentamiento. Asimismo, se incorporó un *tag* identificador del dispositivo para permitir la escalabilidad futura del sistema.

El envío de datos se programó con una frecuencia de 2 segundos mediante el uso de temporizadores no bloqueantes, permitiendo mantener una actualización constante sin afectar el control térmico del sistema.

V-C9. Implementación del sistema de visualización y análisis mediante Grafana: Para complementar el almacenamiento de datos y permitir un análisis avanzado del comportamiento del sistema, se implementó una plataforma de visualización utilizando Grafana, conectada directamente a la base de datos InfluxDB como fuente de datos.

Se configuró un *data source* utilizando el protocolo Flux, permitiendo realizar consultas personalizadas sobre las variables registradas. A partir de estas consultas se diseñaron paneles de visualización que incluyen:

- Curva temporal de temperatura del tambor.
- Comparación entre temperatura real y setpoint.
- Estado del motor y velocidad de rotación.
- Estado del sistema de calentamiento.

Los dashboards desarrollados permiten analizar perfiles de tostado, identificar sobreoscilaciones térmicas y evaluar el desempeño del sistema bajo distintas condiciones operativas.

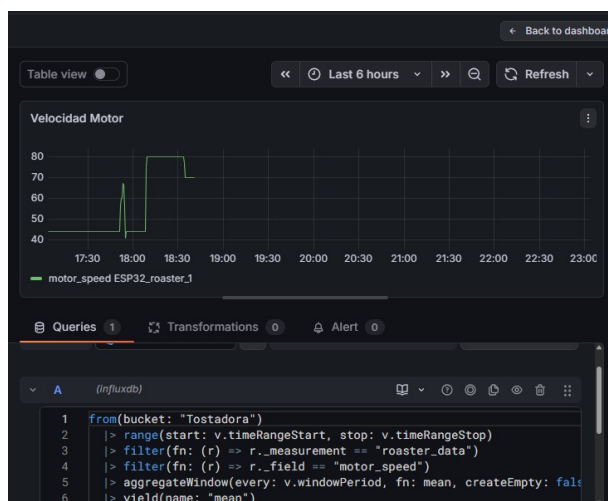


Figura 45. Configuración del dashboard

La integración de Grafana proporciona una capa de análisis superior a la interfaz de control Blynk, ya que permite la visualización histórica estructurada y la exportación de datos para estudios posteriores.

V-C10. Desarrollo de página web: Con el objetivo de complementar el sistema de control y ampliar las capacidades de supervisión del prototipo, se desarrolló una página web orientada al monitoreo avanzado del proceso de tostado. Esta plataforma fue concebida como un entorno independiente del control operativo, encargándose del procesamiento, almacenamiento y visualización de los datos generados durante el funcionamiento del sistema.

La aplicación web permite la presentación estructurada de la información mediante paneles de visualización, en los cuales es posible observar la evolución temporal de las variables del proceso, el estado del sistema, los registros históricos y la detección de eventos asociados a condiciones anómalas. La plataforma web actúa como una herramienta de análisis que facilita la evaluación del desempeño del prototipo y el seguimiento del proceso de tostado a lo largo del tiempo.

La separación entre la interfaz de control implementada en Blynk y la plataforma de supervisión web responde a un criterio de diseño orientado a la organización y escalabilidad del sistema, mientras la aplicación Blynk se utiliza para la interacción directa y el control en tiempo real del prototipo, la página web se destina al análisis de datos, la visualización de perfiles de tostado y el estudio del comportamiento del sistema bajo distintas condiciones de operación.

Para el desarrollo de la aplicación web del prototipo se empleó el entorno de desarrollo integrado PyCharm, debido a que facilita la organización del proyecto, el manejo de entornos virtuales de Python, la instalación de dependencias y la ejecución/depuración del servidor web.

La aplicación se implementó con el framework Flask, el cual permite crear aplicaciones web ligeras en Python mediante el concepto de rutas y el patrón de arquitectura MVC simplificado, donde: el controlador se define en el archivo app.py, la vista se gestiona mediante plantillas HTML con Jinja2, y el modelo se representa mediante estructuras de datos en Python.

En PyCharm se organizó el proyecto con la siguiente estructura típica de Flask:

- app.py: archivo principal encargado de la creación de la aplicación Flask, donde se definen las rutas, la lógica de control y la ejecución del servidor.
- templates/: carpeta que contiene las plantillas HTML utilizadas para la interfaz web, entre ellas index.html, perfiles.html y control.html.
- static/: carpeta destinada a recursos estáticos como hojas de estilo, imágenes o scripts; en este proyecto su uso es opcional, ya que el diseño visual se implementó mediante Bootstrap a través de CDN.

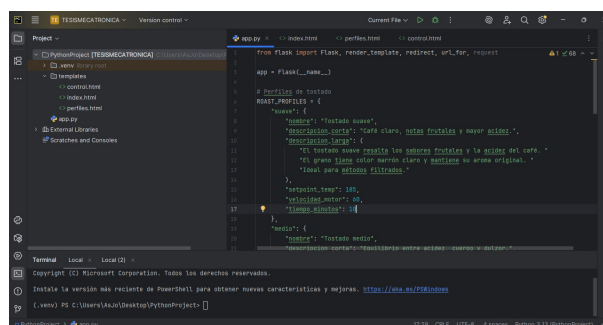


Figura 46. Programación en el entorno de desarrollo Pycharm

Para ejecutar Flask desde PyCharm se seleccionó un intérprete de Python y un entorno virtual, luego se instaló

Flask mediante el gestor de paquetes de Python pip.

La aplicación web se diseñó para mostrar un menú de perfiles de tostado: suave, medio y fuerte, presentar sus parámetros y dirigir al usuario a una pantalla de control asociada al perfil seleccionado. Los perfiles se definieron como un diccionario en Python, lo que permite mantener la información centralizada y facilita su renderización en las plantillas HTML.

```

1 from flask import Flask, render_template, redirect, url_for, request
2
3 app = Flask(__name__)
4
5 # Perfiles de tostado
6 ROAST_PROFILES = {
7     "suave": {
8         "nombre": "Tostado suave",
9         "descripcion_corta": "Cafe claro, notas frutales y mayor acidez.",
10        "descripcion_larga": (
11            "El tostado suave resalta los sabores frutales y la acidez del cafe. "
12            "El grano tiene color marr n claro y mantiene su aroma original."
13            "Ideal para metodos filtrados."
14        ),
15        "setpoint_temp": 185,
16        "velocidad_motor": 60,
17        "tiempo_minutos": 10
18    },
19    "medio": {
20        "nombre": "Tostado medio",
21        "descripcion_corta": "Equilibrio entre acidez, cuerpo y dulzor.",
22        "descripcion_larga": (
23            "El tostado medio ofrece un balance ideal entre acidez y cuerpo. "
24            "Es el perfil m s verstil, usado para espresso y filtrados."
25        ),
26        "setpoint_temp": 200,
27        "velocidad_motor": 70,
28        "tiempo_minutos": 12
29    },
30    "fuerte": {
31        "nombre": "Tostado fuerte",
32        "descripcion_corta": "Cafe intenso, menos acidez y notas a chocolate oscuro."
33        ,
34        "descripcion_larga": (
35            "El tostado fuerte genera sabores intensos, ahumados y a chocolate amargo
36            . "
37            "El grano adquiere un color marron muy oscuro."
38        ),
39        "setpoint_temp": 215,
40        "velocidad_motor": 80,
41        "tiempo_minutos": 14
42    },
43 }

```

Listing 7. Definición de perfiles de tostado y configuración inicial de Flask (app.py)

La aplicación define tres rutas principales: la primera corresponde a la página de inicio, donde se presenta una vista general del sistema, la segunda ruta permite visualizar el listado de perfiles de tostado disponibles y por último la tercera ruta dirige a la pantalla de control asociada al perfil de tostado seleccionado. El framework flask genera direcciones de acceso de forma segura, estructurada y fácil de mantener en futuras actualizaciones.

```
1 @app.route("/")
2 def home():
3     return render_template("index.html")
4
5
6 @app.route("/perfiles")
7 def perfiles():
8     return render_template("perfiles.html", perfiles=ROAST_PROFILES)
9
10
11 @app.route("/seleccionar/<perfil_id>")
12 def seleccionar_perfil(perfil_id):
13     perfil = ROAST_PROFILES.get(perfil_id)
14
15     if not perfil:
16         return redirect(url_for("perfiles"))
17
18     return render_template("control.html", perfil=perfil, perfil_id=perfil_id)
```

Listing 8. Rutas principales y renderizado de plantillas (app.py)

En la ruta `/seleccionar/<perfil_id>` se realiza una validación para evitar acceder a perfiles inexistentes, si el identificador no se encuentra en el diccionario, el sistema redirige al listado de perfiles evitando errores de ejecución y mejorando la robustez de la aplicación.

Durante el desarrollo se ejecutó la aplicación en modo depuración `debug=True` para facilitar la identificación de errores y permitir recarga automática ante cambios del código.

```
1 if __name__ == "__main__":
2     app.run(debug=True)
```

Listing 9. Ejecución del servidor Flask en modo depuración (app.py)

V-C11. Interfaz web: plantillas HTML con Jinja2 y Bootstrap: La interfaz se implementó mediante plantillas HTML en la carpeta `templates`, flask utiliza el motor Jinja2 para renderizar vistas dinámicas a partir de variables enviadas desde el backend. Además se utilizó Bootstrap 5 vía CDN para lograr una interfaz responsiva y estandarizada sin necesidad de crear hojas de estilo locales.

La pantalla de inicio presenta el nombre del sistema y una breve descripción de su funcionalidad, el usuario puede acceder al listado de perfiles de tostado mediante un botón de navegación, que dirige hacia los distintos tipos

de tostados posibles en el prototipo.

```
1 <!DOCTYPE html>
2 <html lang="es">
3 <head>
4   <meta charset="UTF-8">
5   <title>CoffeeRoasterV1 - Bienvenida</title>
6   <link rel="stylesheet"
7     href="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@5.3.3/dist/css/bootstrap.min.
      css">
8 </head>
9 <body class="bg-dark text-light">
10 <div class="container py-5">
11   <h1 class="display-4 fw-bold">CoffeeRoasterV1</h1>
12   <p class="lead">
13     Bienvenido al sistema IoT para controlar tu tostadora de caf :
14     temperatura, velocidad del tambor y perfiles automticos.
15   </p>
16   <hr class="border-light my-4">
17   <a href="{{ url_for('perfiles') }}" class="btn btn-success btn-lg">
18     Elegir perfil de tostado
19   </a>
20 </div>
21 </body>
22 </html>
```

Listing 10. Plantilla de inicio con navegaci3n a perfiles (index.html)

La pantalla de listado de perfiles muestra de forma din3mica los diferentes perfiles de tostado disponibles en el sistema. La informaci3n presentada en esta vista es enviada desde el backend y se organiza autom3ticamente en tarjetas visuales, lo que permite a1adir, modificar o eliminar perfiles de tostado directamente desde la l3gica de la aplicaci3n sin necesidad de realizar cambios en la estructura de la interfaz web.

```
1 <div class="row mt-4">
2   {% for id, perfil in perfiles.items() %}
3   <div class="col-md-4 mb-4">
4     <div class="card h-100 shadow">
5       <div class="card-body text-dark">
6         <h4 class="card-title fw-bold">{{ perfil.nombre }}</h4>
7         <p>{{ perfil.descripcion_corta }}</p>
8         <ul class="list-unstyled">
9           <li><strong>Setpoint:</strong> {{ perfil.setpoint_temp }}C</li>
10          <li><strong>Velocidad tambor:</strong> {{ perfil.velocidad_motor
              }} %</li>
11          <li><strong>Tiempo estimado:</strong> {{ perfil.tiempo_minutos }}
              min</li>
```

```

12         </ul>
13         <a href="{{ url_for('seleccionar_perfil', perfil_id=id) }}"
14             class="btn btn-success w-100">
15             Seleccionar perfil
16         </a>
17     </div>
18 </div>
19 </div>
20 {% endfor %}
21 </div>

```

Listing 11. Iteración con Jinja2 para mostrar perfiles (perfiles.html)

V-C12. Publicación del servidor local mediante Ngrok: La aplicación hecha en Flask se ejecuta localmente en el computador por defecto en `http://127.0.0.1:5000`; sin embargo, este servidor local no es accesible desde redes externas. Para permitir acceso remoto temporal se utilizó Ngrok, para crear un túnel seguro desde Internet hacia un puerto local, generando una URL pública que redirige al servidor en el equipo de desarrollo.

- Flask inicia el servidor local en el puerto 5000.
- Ngrok crea un túnel hacia ese puerto local.
- Ngrok entrega una URL pública (HTTP/HTTPS) para acceder desde cualquier red.

Para publicar el servidor Flask local, se ejecuta Ngrok apuntando al puerto en el que se encuentra Flask.

```

1 ngrok http 5000

```

Listing 12. Ejecución de Ngrok para exponer el servidor Flask local

Al detener el proceso de Ngrok la URL pública deja de estar disponible, con el fin de asegurar cambios no deseados en el proceso.

V-D. Fase de Implementación

V-D1. Selección del tipo de tostadora: Con base en el análisis realizado en el marco teórico sobre los distintos tipos de tostadoras de café, se determinó que el prototipo desarrollado corresponde a una tostadora de tipo tambor giratorio. Esta selección se realizó considerando criterios técnicos, operativos y de aplicabilidad al contexto de pequeños productores y procesos de tostado a escala reducida.

La tostadora de tambor se caracteriza por el uso de un cilindro metálico rotativo en cuyo interior se alojan los granos de café, los cuales son sometidos a una fuente de calor mientras el movimiento continuo del tambor favorece la mezcla y la distribución uniforme de la temperatura. Este principio de funcionamiento permite un mayor control del perfil térmico y una mejor repetibilidad del proceso en comparación con métodos manuales o sistemas de calentamiento estático.

El prototipo propuesto incorpora un tambor giratorio accionado por un motor eléctrico, una resistencia calefactora como fuente de calor principal y un sistema de medición de temperatura que permite monitorear el comportamiento térmico durante el tostado. Estos elementos se integran sobre un chasis metálico que proporciona soporte estructural y estabilidad mecánica al conjunto, facilitando además el montaje de los componentes eléctricos y electrónicos.

La elección de este tipo de tostadora resulta adecuada para la implementación de sistemas de control automático, ya que permite regular de manera independiente la potencia térmica y la velocidad de rotación del tambor, variables fundamentales para la obtención de distintos perfiles de tostado. Su diseño es compatible con la integración de sensores y plataformas IoT, lo que facilita la supervisión remota y el análisis del proceso en tiempo real.

En función de estas características, la tostadora de tambor giratorio fue seleccionada como la configuración más apropiada para el desarrollo del prototipo automatizado, garantizando un equilibrio entre simplicidad constructiva, control del proceso y escalabilidad del sistema.

V-D2. Construcción y montaje: Definido el tipo de tostadora y la configuración general del sistema, se inicio la construcción y montaje del prototipo. Se fabricó la estructura metálica que conforma el chasis, los soportes y el tambor giratorio, asegurando la rigidez mecánica y la correcta alineación de los componentes.

Se instaló la resistencia calefactora como fuente de calor principal, junto con el aislamiento térmico necesario para minimizar pérdidas de energía y proteger los elementos externos del sistema, el motor eléctrico DC usado aseguro un movimiento continuo y controlado durante el proceso de tostado.

Se realizó el cableado eléctrico del sistema, incorporando canalización adecuada y protecciones térmicas y eléctricas con el fin de asegurar un funcionamiento seguro y confiable del prototipo durante las pruebas experimentales.

V-D3. Comunicación IoT y supervisión remota: El ESP32 gestiona la comunicación inalámbrica con las plataformas de supervisión remota mediante conexión Wi-Fi. Los datos del proceso tales como: temperatura, velocidad del tambor y estado del sistema, son enviados periódicamente hacia la plataforma Blynk IoT.

Blynk se utiliza como interfaz de control remoto, permitiendo al usuario visualizar variables en tiempo real y enviar comandos básicos al sistema. De forma complementaria, los datos transmitidos pueden ser utilizados por una página web de supervisión y control automático de perfiles, registros históricos y visualización del comportamiento del proceso durante el tiempo de operación.

V-D4. Gestión de estados y seguridad del sistema: El firmware incorpora rutinas de seguridad destinadas a proteger el sistema ante sobrecalentamientos de la resistencia. Ante la detección de una temperatura elevada, el sistema ejecuta acciones preventivas, tales como la desconexión de la resistencia calefactora en caso e que se pierda la conexión, el sistrema notifica el evento a las plataformas de supervisión remota. Esta gestión de estados contribuye a un funcionamiento más seguro y confiable del prototipo durante las pruebas experimentales.

V-E. Condiciones de operación del prototipo

Previo a la ejecución de las pruebas experimentales, se definieron las condiciones de operación bajo las cuales funcionaría el prototipo de tostadora automática de café. Estas condiciones permitieron establecer un marco de referencia común para todas las pruebas, asegurando coherencia entre los ensayos y evitando variaciones no controladas durante la fase de validación.

Las condiciones de operación se establecieron considerando una carga promedio de 270 g de café por ciclo, con un rango de temperatura entre 180 °C y 230 °C, dependiendo del nivel de tostado requerido. La velocidad de rotación del tambor se mantuvo aproximadamente en 30 rpm, valor suficiente para una mezcla uniforme del grano durante el proceso. El tiempo total de tostado varió entre 8 a 20 minutos, según el perfil seleccionado.

Previo a cada prueba, el sistema se sometió a una fase de precalentamiento de aproximadamente 5 minutos, hasta alcanzar la temperatura adecuada. La secuencia de apagado incluyó el corte de la resistencia mediante el relé de estado sólido. Estas condiciones se plantearon para realizar ensayos repetibles y comparables, reduciendo la influencia de variaciones externas en los resultados obtenidos.

V-E1. Criterios de Aceptación: El prototipo se considera aceptable si:

- **Control térmico:** mantiene el setpoint con un error estable dentro del margen establecido.
- **Nivel de tueste:** produce café dentro del rango Agtron definido.
- **Estabilidad:** opera de forma continua y segura sin fallos críticos.
- **Supervisión remota:** transmite datos y recibe comandos de manera confiable.

V-F. Fase de Validación

La fase de validación tuvo como finalidad comprobar que el prototipo desarrollado cumple con los requerimientos establecidos durante las etapas de análisis y diseño. Esta etapa no se limitó únicamente a verificar el encendido y funcionamiento básico del sistema, sino que buscó evaluar su comportamiento real bajo condiciones controladas de operación, considerando tanto el desempeño térmico como la estabilidad mecánica y la precisión de la supervisión remota.

V-F1. Enfoque de validación: La validación se llevó a cabo mediante ensayos experimentales ejecutados con el prototipo en funcionamiento. Durante estas pruebas se sometió al sistema a diferentes escenarios, variando la temperatura, la cantidad de café procesado y la velocidad de rotación del tambor.

El propósito fue observar la respuesta del sistema ante cambios en las condiciones de trabajo, analizar su estabilidad una vez alcanzado el régimen permanente y verificar su comportamiento frente a situaciones que pudieran comprometer su operación normal.

V-F2. Pruebas realizadas: Para estructurar el proceso de evaluación se desarrollaron pruebas térmicas, dinámicas y de robustez. En las pruebas térmicas se aplicaron modificaciones en el setpoint y se registró la evolución de la

temperatura hasta alcanzar valores cercanos al punto de referencia, prestando especial atención al tiempo requerido para estabilizarse y al comportamiento dentro de la banda de histéresis configurada.

En las pruebas dinámicas se realizaron variaciones controladas en la velocidad de rotación del tambor, con el fin de analizar su influencia sobre la distribución térmica y la uniformidad del tostado. Estas pruebas permitieron verificar que el sistema mantenga estabilidad incluso ante cambios en la agitación del grano.



Figura 47. Prueba de tostado con el prototipo, por A. Santana y A. Veintimilla.

V-F3. Criterios de evaluación: Para determinar si el sistema cumple con los objetivos planteados se definieron criterios claros de evaluación. Se consideró el tiempo necesario para que la temperatura alcance y mantenga valores próximos al setpoint, así como la diferencia promedio entre la temperatura real y la temperatura objetivo una vez alcanzada la estabilidad.

También se evaluó la uniformidad del tostado mediante observación directa del grano y comparación con la referencia de la escala Agron, utilizada como guía para identificar el nivel de tueste obtenido.

Adicionalmente, se verificó la continuidad en la transmisión de datos hacia las plataformas de supervisión, comprobando que la información generada por el sistema se registre de forma consistente sin interrupciones significativas.

El prototipo se considera satisfactorio cuando mantiene la regulación térmica dentro del margen previsto, opera de manera estable sin fallos críticos y garantiza la correcta comunicación con las plataformas de monitoreo remoto.

V-F4. Validación de la supervisión remota: Finalmente, se validó el funcionamiento de la arquitectura IoT implementada. Durante las pruebas se comprobó que los datos enviados por el ESP32 se almacenen correctamente en la base de datos y puedan visualizarse en tiempo real tanto en la aplicación Blynk como en los dashboards configurados en Grafana.

Por último se verificó que los comandos enviados desde la interfaz remota sean recibidos y ejecutados de manera coherente y a tiempo por el sistema físico con el fin de comprobar la adecuada integración entre la capa de adquisición, el almacenamiento en la nube y la visualización avanzada del proceso.

VI. RESULTADOS

VI-A. Piezas mecánicas del prototipo

El mecanizado fue realizado en un torno convencional para la fabricación de componentes cilíndricos del sistema. Las piezas fueron trabajadas en acero inoxidable y aluminio, con tolerancias dimensionales aproximadas de ± 0.2 mm, suficientes para el acople mecánico requerido en el tambor de tostado.

Durante el mecanizado se realizaron operaciones de cilindrado exterior y refrentado para superficies uniformes y concéntricas, posteriormente esto redujo vibraciones durante la rotación del tambor a 10 rpm en las pruebas experimentales.



Figura 48. Operación de mecanizado en el torno, por A. Santana y A. Veintimilla.

Se realizó mecanizado a los acoples destinados a unir el eje del motor con el tambor de tostado. Estos elementos fueron fabricados con un diámetro interior ajustado al eje del motor y un diámetro exterior compatible con la estructura del tambor, asegurando transmisión de torque sin deslizamiento.

El mecanizado permitió obtener un ajuste firme, evitando vibraciones o desalineación durante la operación. Tras la instalación, el sistema mantuvo rotación estable sin oscilaciones perceptibles.

Las piezas mecanizadas que conforman el sistema estructural del prototipo, incluyendo tambor, puerta frontal, acoples y soportes internos, fueron creadas a partir del torno y usando elementos externos como pulidora y cortadora. Cada componente fue fabricado considerando dimensiones compatibles con la capacidad de carga de 290 g por ciclo y con el espacio disponible en la cámara de tostado.

VI-B. Integración mecánica

La estructura metálica soporta un tambor cilíndrico fabricado en acero inoxidable AISI 304, cuyo dimensionamiento fue previamente determinado a partir del cálculo geométrico del volumen del cilindro:

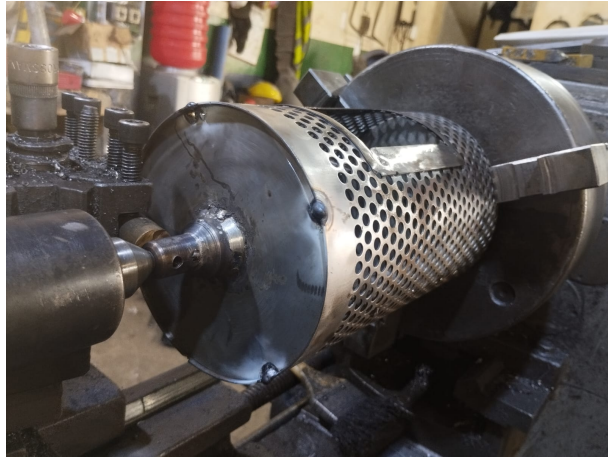


Figura 49. Operaciones de mecanizado al tambor, por A. Santana y A. Veintimilla.

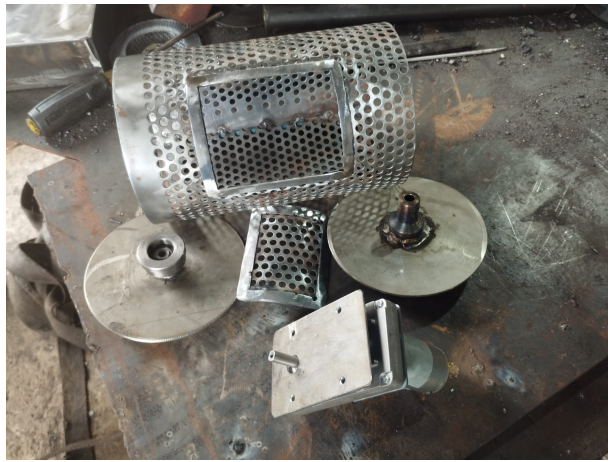


Figura 50. Piezas que conforman el tambor, por A. Santana y A. Veintimilla.

$$V = \pi r^2 L \quad (13)$$

Sustituyendo los valores de diseño se obtuvo un volumen aproximado de:

$$V = 0,0034 \text{ m}^3 \quad (14)$$

A partir de la densidad aparente del café verde $\rho \approx 650 \text{ kg/m}^3$, la masa máxima teórica del tambor fue estimada mediante:

$$m = \rho \cdot V \quad (15)$$

obteniéndose una capacidad aproximada de 2.21 kg. No obstante, considerando las limitaciones del motorreductor y el factor de seguridad adoptado, la capacidad real de operación fue ajustada mediante el análisis de torque.

El torque máximo recomendable para operación continua fue definido como:

$$T_{seguro} = \frac{T_{motor}}{FS} \quad (16)$$

donde, para el presente diseño:

$$T_{seguro} = \frac{1,8}{1,5} = 1,2 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (17)$$

El torque requerido para movilizar el tambor vacío fue calculado a partir de:

$$T_{tambor} = Fr \quad (18)$$

con:

$$F = mg \quad (19)$$

lo que dio como resultado:

$$T_{tambor} = 1,00 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (20)$$

El torque disponible para la carga de café quedó definido como:

$$T_{cafe} = T_{seguro} - T_{tambor} \quad (21)$$

$$T_{cafe} = 0,2 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (22)$$

Despejando la masa correspondiente a dicho torque disponible:

$$F = \frac{T}{r} \quad (23)$$

$$m = \frac{F}{g} \quad (24)$$

se obtuvo una capacidad de operación aproximada de:

$$m_{cafe} \approx 0,29 \text{ kg} \quad (25)$$

Durante las pruebas experimentales con esta carga nominal, el sistema mantuvo una velocidad cercana a 10 rpm sin evidenciar sobreesfuerzo del motor, vibraciones apreciables ni desalineación mecánica. El dimensionamiento estructural y el análisis de torque realizados en la fase de diseño son coherentes con el comportamiento real del prototipo.



Figura 51. Prototipo físico ensamblado, por A. Santana y A. Veintimilla.

VI-C. Integración de componentes

La integración electrónica del prototipo se diseñó en función de las exigencias mecánicas y térmicas determinadas durante la etapa de cálculo. El accionamiento del tambor requiere un torque nominal de 1.8 N·m, del cual se definió que el torque seguro de operación debería ser de 1.2 N·m considerando un factor de seguridad de 1.5, el torque necesario para el movimiento del tambor vacío fue de aproximadamente 1.0 N·m, quedando un margen disponible para la carga de café cercana a 0.2 N·m. Con base en estas condiciones se usó el driver BTS7960, módulo capaz de manejar corrientes elevadas y trabajar con tensiones compatibles con el motor DC empleado, asegurando que el motor sea capaz de moverse y soportar la carga introducida al tambor.

El BTS7960 permite el control del motor mediante señales PWM y pines de habilitación independientes, con esta característica se maneja el control de velocidad requerido en el sistema, donde la modulación por ancho de pulso generada por el ESP32 permite ajustar la rotación del tambor sin pérdidas significativas de eficiencia. La frecuencia de trabajo configurada en 20 kHz reduce el ruido audible del motor. La interconexión se realizó utilizando pines GPIO del ESP32 destinados a generación de PWM por hardware a través del periférico LEDC, evitando soluciones por software que puedan introducir inestabilidad temporal.

Para el control de la resistencia calefactora se integró un relé de estado sólido con entrada de control en rango de 3–24 VDC y salida para conmutación de 120 VAC. Esta configuración asegura aislamiento eléctrico entre la etapa de potencia y el microcontrolador, protegiendo al sistema de control frente a sobrecorrientes. La resistencia

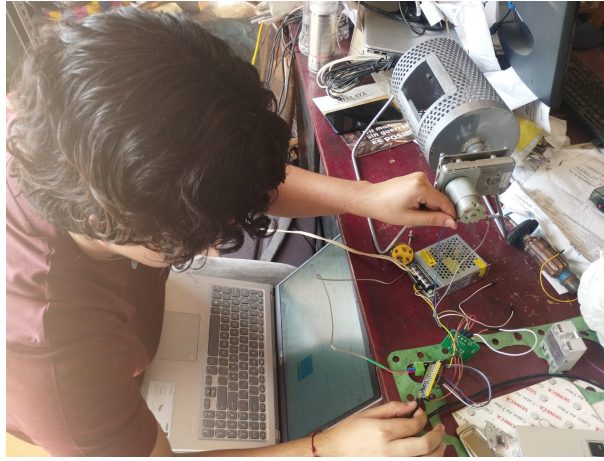


Figura 52. Prueba en conjunto mecánica/electrónica

calefactora se alimenta directamente desde la red eléctrica mientras el SSR actúa como elemento de conmutación controlado por señal digital del ESP32.

Para la medición de temperatura se usó un termocupla tipo K junto al módulo MAX6675 el cual convierte la señal termoelectrónica en un valor digital a través de comunicación SPI, permitiendo una lectura estable en rangos elevados de temperatura. Este sensor cuenta con gran robustez frente a ambientes térmicos exigentes, además de presentar compatibilidad directa con microcontroladores de arquitectura similar al ESP32. La conexión se realizó utilizando pines SPI dedicados en la transmisión de datos.

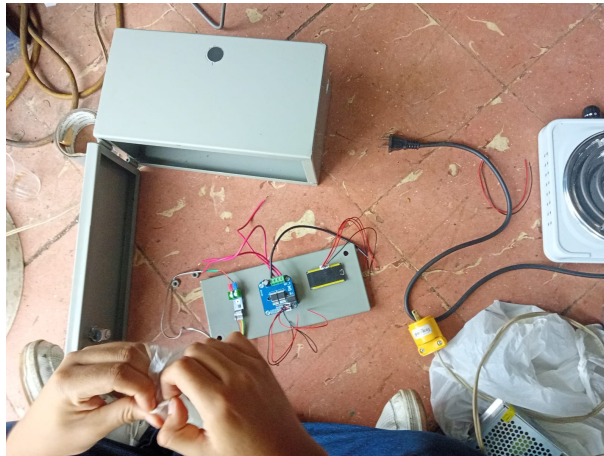


Figura 53. Ensamblado mecánico y electrónico, por A. Santana y A. Veintimilla.

El ESP32 actúa como núcleo de integración del sistema, su capacidad de procesamiento y conectividad WiFi integrada permiten unificar adquisición de datos, control de actuadores y transmisión hacia plataformas IoT sin necesidad de hardware adicional. Los GPIO fueron asignados considerando funciones específicas como PWM, comunicación SPI y control digital aislado, evitando conflictos internos y optimizando la arquitectura eléctrica general.

La integración final se realizó en la caja de control en la que se depositaron todos los componentes para un entorno aislado, seguro y apartado de la tostadora evitando fallas o perjudicar a los equipos.



Figura 54. Puesta de equipos electrónicos, por A. Santana y A. Veintimilla.

VI-D. Resultados del firmware

El firmware desarrollado en el ESP32 integra las funciones de adquisición de temperatura, control del motor, conmutación de la resistencia y transmisión de datos hacia la nube de Blynk IoT. La estructura general del programa sigue un esquema no bloqueante, evitando el uso de retardos por software que puedan afectar la comunicación IoT.

El firmware presenta una secuencia de inicialización, conexión WiFi, sincronización de tiempo, lectura periódica del sensor, ejecución del control térmico y envío de datos hacia las plataformas remotas.

La lógica principal del sistema se ejecuta dentro del void loop() del microcontrolador:

```
1 void loop() {  
2   Blynk.run();  
3   timer.run();  
4   controlResistenciaTemp();  
5 }
```

Durante las pruebas operativas se verificó que la lectura de temperatura obtenida mediante el termocupla tipo K y el módulo MAX6675 se mantiene estable dentro del rango esperado para el proceso de tostado. Los valores inválidos o fuera de rango son descartados por el firmware antes de ser utilizados en la lógica de control, evitando decisiones erróneas ante posibles fallos del sensor.

El control del motor mediante modulación PWM fue estable en el rango de velocidad configurado, la frecuencia de 20 kHz permitió un accionamiento suave del tambor, sin vibraciones perceptibles ni cambios abruptos en la

velocidad de rotación.

Se usaron variables internas para controlar el sistema mediante el firmware embebido.

Tabla VI
VARIABLES PRINCIPALES DEL FIRMWARE

Variable	Tipo	Función
tempFilt	float	Temperatura filtrada del tambor
setpointC	int	Temperatura objetivo
motorEnabled	bool	Estado del motor
speedPercent	int	Nivel de PWM aplicado
ssrEstado	bool	Estado lógico de la resistencia

La activación del relé de estado sólido respondió correctamente a los cambios de setpoint y al método histéresis en el código. No se observaron conmutaciones excesivas ni estados intermedios inestables durante los ciclos de prueba.

El sistema mantuvo comunicación estable con la red WiFi y con la plataforma IoT durante sesiones completas de tostado, mientras la red permanezca estable la comunicación es en tiempo real. No se registraron reinicios inesperados ni bloqueos del microcontrolador en los ensayos realizados.

VI-E. Integración Web

VI-E1. Almacenamiento en InfluxDB: InfluxDB fue utilizada como base de datos orientada a series temporales, adecuada para registrar variables que evolucionan en función del tiempo, como la temperatura del tambor, el estado de la resistencia y la velocidad del motor.

Cada registro almacenado contiene:

- Marca temporal automática.
- Medición principal.
- Campos asociados.
- Etiquetas para identificación de sesión o perfil de tostado.

El envío de datos se realizó desde el ESP32 junto a la aplicación in termmedia mediante solicitudes HTTP, esta solución mantuvo un registro continuo del comportamiento térmico durante cada ciclo de operación.

VI-E2. Visualización y análisis en Grafana: Grafana fue implementado como herramienta de visualización avanzada conectada directamente a la base de datos InfluxDB.

Se diseñaron dashboards específicos para representar:

- Dashboard de temperatura del tambor.

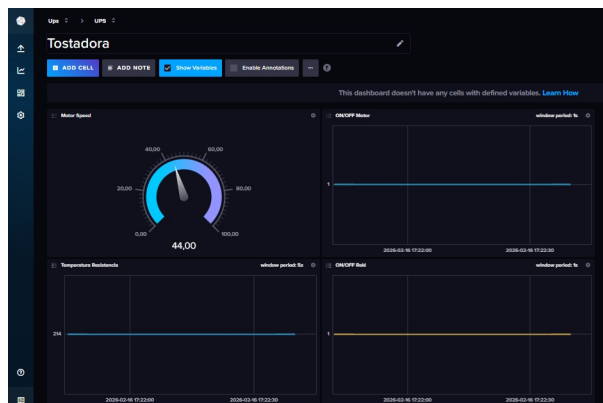


Figura 55. Dashboards con series temporales, por A. Santana y A. Veintimilla.

- ON/OFF del motor y resistencia.
- Velocidad del motor.

En las representaciones gráficas se observa el comportamiento del prototipo, pendientes de incremento térmico y momentos de activación de la resistencia. Esto eleva el nivel de análisis al ofrecido únicamente por la visualización en tiempo real de la aplicación Blynk.

Grafana no interviene en la lógica de control debido a que su función se limita a la interpretación y análisis visual de los datos registrados.

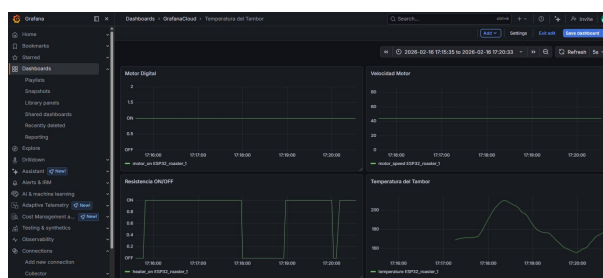


Figura 56. Dashboards con Grafana, por A. Santana y A. Veintimilla.

VI-E3. Desarrollo de la aplicación web en Flask: La aplicación web desarrollada junto al framework Flask en el entorno PyCharm, cumplió con las funciones de interacción estructurada con el usuario y puesta en marcha de perfiles de tostado.

La aplicación web se publica temporalmente mediante Ngrok, creando un túnel seguro hacia el servidor local de Flask y permitiendo acceso remoto durante las pruebas.

La arquitectura implementada sigue un esquema tipo cliente-servidor, donde:

- El backend (app.py) gestiona las rutas y la lógica de control.
- Las plantillas HTML renderizadas con Jinja2 presentan la información de manera dinámica.

- Bootstrap fue utilizado para garantizar una interfaz responsiva y estandarizada.

La pagina creada con este marco de trabajo respondió adecuadamente en el servidor mostrando la interfaz interactiva de bienvenida, en la cual se muestran las configuraciones e interacciones que el usuario podra realizar mientras este conectado.



Figura 57. Interfaz web de inicio, por A. Santana y A. Veintimilla.

Los perfiles de tostado fueron definidas para permitir centralizar parámetros como temperatura objetivo, velocidad del tambor y tiempo estimado. Esta estructura facilita la escalabilidad del sistema, ya que nuevos perfiles pueden añadirse sin modificar la arquitectura general.

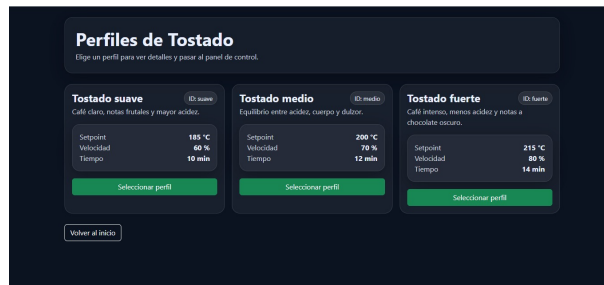


Figura 58. Perfiles de tostado, por A. Santana y A. Veintimilla.

Los perfiles de tostado se seleccionan en base a la necesidad del tostado del grano para tener un control y monitoreo real en base al perfil seleccionado, se usa un centro de control, esta interacción controla el prototipo seteando los puntos a los cuales debe trabajar.

VI-F. Pruebas experimentales del prototipo

Las pruebas experimentales se realizaron con el prototipo completamente ensamblado y operando bajo las condiciones definidas en la fase metodológica. Se trabajó con una carga promedio de 290 g grano por ciclo, manteniendo una velocidad de rotación cercana a 10 rpm y aplicando los perfiles térmicos previamente establecidos.

Durante cada ensayo se registró la evolución de la temperatura del tambor y el comportamiento del sistema de calentamiento. Se verificó que el incremento térmico siga una tendencia progresiva hasta aproximarse al setpoint definido para el perfil seleccionado. El sistema mantuvo estabilidad dentro del rango esperado, sin oscilaciones abruptas ni interrupciones en la rotación del tambor.

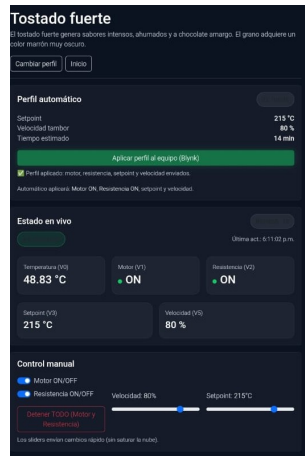


Figura 59. Control interactivo con el prototipo, por A. Santana y A. Veintimilla.

Para evaluar el nivel de tostado alcanzado se utilizó como referencia la escala Agtron, ampliamente empleada para clasificar el grado de tueste en función del color del grano. La comparación visual del café obtenido con los valores de referencia permitió determinar que el resultado corresponde al perfil programado, evidenciando congruencia entre el control térmico aplicado y el nivel de tostado alcanzado.

En el caso del tostado suave, el grano presentó una coloración marrón claro uniforme, sin presencia de zonas carbonizadas ni diferencias apreciables entre unidades del mismo lote. Esto confirma que la distribución térmica dentro del tambor fue homogénea y que el sistema mecánico aseguró una adecuada agitación durante el proceso.

Los resultados obtenidos validan el comportamiento esperado del prototipo bajo condiciones reales de operación y permiten afirmar que la integración entre control térmico, accionamiento mecánico y supervisión remota se ejecutó de manera coherente.



Figura 60. Tostado suave de almendra, A. Santana y A. Veintimilla.

Se observa el resultado correspondiente a un perfil de tostado suave aplicado a 290 g de almendra. El proceso alcanzó una temperatura máxima de aproximadamente 185 °C en un tiempo cercano a 9 minutos, el color obtenido estimado es de 65–70 en la escala Agtron, característico de tostados claros. No se evidenciaron zonas con

sobrecalentamiento ni diferencias marcadas entre granos, lo que confirma una transferencia térmica uniforme y una rotación estable del tambor a 10 rpm durante el ciclo de trabajo.



Figura 61. Prueba de tostado con cacao, A. Santana y A. Veintimilla.

Se muestra el estado inicial del cacao antes del proceso de tostado. El grano presenta una tonalidad marrón claro con superficie mate y alta humedad superficial. Previo al tostado, se registró una temperatura ambiente de 30 °C, con estas condiciones se definieron el mejor perfil térmico para granos de café.

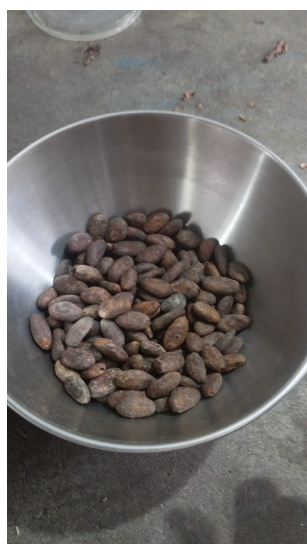


Figura 62. Cacao tostado, A. Santana y A. Veintimilla.

Se presenta el cacao después de aplicar un perfil de tostado medio a oscuro, con una temperatura final cercana a 220 °C y un tiempo total de 13 a 16 minutos. El color final del grano se ubica en un rango estimado de 35–45 en la escala Agtron, correspondiente a tostados medios–oscuros. Se observó un cambio significativo en el tono, pasando de marrón claro a marrón oscuro homogéneo, sin presencia de quemaduras superficiales ni fracturas excesivas.

El sistema mantuvo rotación constante y no se registraron caídas de potencia ni interrupciones mecánicas. La comparación visual con referencias Agtron confirmó coherencia entre el perfil programado y el resultado obtenido, validando el control térmico implementado en el prototipo.

VIII. PRESUPUESTO

En esta sección se presenta el presupuesto para el desarrollo del prototipo de la tostadora automatizada. Se detallan los componentes electrónicos, materiales mecánicos y costos logísticos asociados a la construcción, ensamble y puesta en marcha del sistema.

Tabla VII
PRESUPUESTO DE MATERIALES Y COSTOS DEL PROTOTIPO

Nombre del elemento	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Valor total (\$)
Sensor de temperatura MAX31855	Unidades	1	\$10	\$10
Motor DC	Unidad	1	\$35	\$35
Driver de motores (BTS7960)	Unidad	1	\$20	\$20
Microcontrolador (ESP32)	Unidad	1	\$12	\$12
Acero inoxidable 304	Plancha	2	\$60	\$120
Cables	Set	2	\$10	\$20
Conectores	Set	1	\$6	\$6
Termoencogible para cable	Set	1	\$2	\$2
Rulimán	Set	1	\$8	\$8
Tornillos y tuercas	Set	3	\$3	\$9
Resistencia Eléctrica	Unidades	1	\$8	\$8
Relé SSR	Unidades	1	\$15	\$15
Caja metálica personalizada	Unidades	1	\$30	\$30
SUBTOTAL				\$295
Mano de obra	Corte de plancha	1	\$150	\$150
SUBTOTAL COSTOS LOGÍSTICOS				\$150
TOTAL				\$445

IX. CONCLUSIONES

El desarrollo del presente trabajo permitió modelar un prototipo funcional de tostadora de café automatizada tipo tambor, integrando de manera adecuada los componentes mecánicos, electrónicos y de comunicación IoT. En la parte mecánica se diseñaron y fabricaron acoples para asegurar la correcta transmisión de torque entre el sistema motriz y el tambor de tostado, esto da estabilidad rotacional y uniformidad en el movimiento. El diseño ya ensamblado cumplió con los requisitos estructurales y funcionales propios de una tostadora de tipo tambor, la transferencia de calor de la resistencia hacia el grano fue dada por el setpoint de temperatura el cual mantuvo su rango en todo momento.

En la parte electrónica se implementó un sistema automatizado basado en el microcontrolador ESP32 para gestionar tanto la resistencia calefactora como el motor de rotación del tambor. La comunicación IoT junto a la aplicación Blynk, utilizada como backend para el control remoto y la supervisión de variables en tiempo real, a través del uso de pines virtuales y variables enteras y flotantes configuradas según el tipo de variable a medir, logró una comunicación estable y eficiente entre la interfaz de usuario y el hardware físico, asegurando así el envío y recepción de datos de manera confiable. Esta configuración permitió establecer un control preciso de la potencia térmica y del comportamiento del sistema.

Para la parte de visualización y registro, se implementó un sistema de datos mediante InfluxDB, lo que permitió almacenar y analizar parámetros relevantes del proceso, tales como temperatura, estado del motor y activación de la resistencia calefactora. La representación gráfica de los datos facilitó la evaluación del rendimiento de la máquina y el análisis de perfiles de tostado. También se desarrolló una página web que funciona como plataforma de monitoreo y control adicional, donde se pueden observar parámetros claros asociados a los diferentes tipos de tueste, así como acceder a registros históricos del prototipo. Esta página es accesible mediante enlace web, permitiendo su uso remoto por parte de personas capacitadas en el manejo del sistema.

Las validaciones experimentales realizadas demostraron la congruencia entre el diseño propuesto y los resultados obtenidos. Se realizaron pruebas no solo con café, sino también con otros productos como almendra, nueces y cacao, agrupándolos en diferentes proporciones para simular condiciones diversas de tostado. En estos casos se verificó la correspondencia con la escala de Agtron mencionada en los capítulos anteriores, los resultados demostraron que el sistema mantiene estabilidad térmica, repetibilidad en los perfiles y capacidad de adaptación a distintos tipos de carga.

Con la puesta en marcha de este sistema, se valida una solución que equilibra el diseño mecánico con la comunicación IoT. el prototipo es capaz de automatizar, monitorear y registrar datos en tiempo real demuestra que la arquitectura propuesta es viable y robusta. Esto abre un abanico de posibilidades para próximas etapas, destacando la potencial incorporación de modelos predictivos de inteligencia artificial para optimizar el tostado o la adaptación del diseño a entornos de producción grandes.

X. RECOMENDACIONES

Para la elaboración y mejora continua del prototipo se debe prestar especial atención al dimensionamiento mecánico del sistema mecánico. Es fundamental asegurar que el motor seleccionado tenga el torque necesario para soportar la carga dinámica del grano durante el proceso de tostado y las velocidades de operación previstas. Antes de proceder al mecanizado de piezas, se debe modelar previamente en un software de diseño como SolidWorks, donde se puedan realizar análisis de esfuerzo y simulaciones de carga, con el fin de verificar que tanto las piezas individuales como el ensamble completo sean capaces de soportar las sollicitaciones mecánicas sin deformaciones excesivas ni fallas estructurales, reduciendo así costos por reprocesos o rediseños posteriores.

En cuanto al desarrollo del firmware, se recomienda realizar pruebas preliminares directamente en el entorno de Arduino IDE, utilizando herramientas como el monitor serie para observar el comportamiento del sistema en tiempo real. Este paso permite validar la lectura de sensores, el envío de datos, la respuesta de los actuadores y la correcta ejecución de las rutinas de control antes de integrar completamente el sistema con la plataforma IoT. Las pruebas individuales facilitan la detección temprana de errores lógicos o problemas de comunicación, evitando que las fallas no se corrijan a tiempo o cuando el sistema ya se encuentre en operación continua.

Respecto a los sistemas de visualización y monitoreo, es indispensable gestionar adecuadamente la configuración de credenciales y parámetros de conexión, especialmente en lo relacionado con los tokens y el Org ID tanto de Blynk como de InfluxDB. Una incorrecta correlación entre estos identificadores puede impedir la visualización adecuada del rendimiento de la máquina. Se recomienda definir claramente los espacios de almacenamiento y las bases de datos donde se generarán las dashboards, vinculando cada variable según corresponda, ya sea velocidad del motor, estado de la resistencia o temperatura registrada. Una correcta organización de estas variables facilita el análisis posterior y mejora la interpretación de los datos históricos.

Al momento de desarrollar la página web, se necesita fortalecer su carácter interactivo, procurando que la interfaz permita a los usuarios controlar el prototipo de manera intuitiva y clara. El diseño debe priorizar la transparencia, mostrando los parámetros más relevantes del proceso y evitando sobrecargar la pantalla con información innecesaria, también se debe reducir los errores de operación durante el manejo remoto del sistema.

Las pruebas experimentales deben realizarse con múltiples tipos de granos y diferentes niveles de tostado, a fin de verificar que la máquina mantenga un comportamiento estable bajo distintas condiciones de carga. Evaluar variaciones en cantidad, densidad y tipo de producto permite validar la consistencia y mecánica del prototipo. Esto contribuye a procurar que el sistema no solo funcione en condiciones ideales, sino que también responda adecuadamente ante escenarios diversos, fortaleciendo la confiabilidad general del diseño.

REFERENCIAS

- [1] Reallogistics, «Global coffee production in 2024: Market growth, key producers, and price trends,» 2025.
- [2] E. S. Cedeño Ortega, «Análisis de la Producción Nacional de Café Arábigo en Ecuador y oportunidades de exportación al mercado europeo,» Ecuador, 2024.
- [3] B. Muluken y E. Shimelis, «Effects of coffee roasting technologies on cup quality and bioactive compounds of specialty coffee beans,» 2020.
- [4] J. Baggenstoss, L. Poisson, R. Kaegi, R. Perren y F. Escher, «Coffee roasting and aroma formation: Application of different time temperature conditions,» Tesis doct., Suiza, 2008.
- [5] M. Medina Micolta y R. Luna Merchán, «Análisis de la cadena del café y estrategia de mejoras para el sector caficultor en la Provincia de Manabí Cantón Jipijapa Parroquia Pedro Pablo Gómez,» Ecuador, 2013.
- [6] M. D. Paredes Gutiérrez, «Análisis de dispositivos IoT para uso en domótica y su desarrollo en la ciudad de Guayaquil,» Ecuador, 2024.
- [7] J. F. Albán Yáñez, «Diseño de un modelo de gestión basado en la metodología del balanced scorecard para la empresa Café Águila de Oro,» Ecuador, 2012.
- [8] M. D. Toroche Novillo y F. X. Villa Pulla, «Diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao,» Ecuador, 2021.
- [9] B. E. V. Corredor y C. A. C. Alvernia, «Diseño de una tostadora de café con sistema de control seleccionado dirigido a los pequeños productores del sector cafetero de norte de Santander,» Cúcuta, Colombia, 2017.
- [10] Y. K. Ningsih y F. Bonita, «Design and Development of a Smart Café System Utilizing IoT for Real-Time Remote Monitoring and Updates,» 2022.
- [11] L. D. B. Imbaquingo, «Sistema de control para mejorar el desempeño de una máquina tostadora de café,» Ibarra, Ecuador, 2019.
- [12] J. C. T. Asanza, «Diseño y construcción de una tostadora de café semiautomática con una capacidad de 8 KG,» Tesis de mtría., Quito, Ecuador, 2023.
- [13] B. Valdés y C. Campo, «Diseño de una tostadora de café con sistema de control seleccionado dirigido a los pequeños productores del sector cafetero de Norte de Santander,» 2024.
- [14] J. W. Wibowo, A. Munandar, O. Mahendra, J. V. Josary, D. I. S. Ningrum y B. Sejati, «A review of a smart coffee roaster: electronics, design, and artificial intelligence,» 2022.
- [15] E. M. Torres, «Diseño y construcción de un prototipo con sistema SCADA para control de microclima y dosificación en silos,» Quito, Ecuador, 2006.
- [16] I. C. Duarte, *Cálculo y diseño de una tostadora de café para la microempresa Faraón*, Mencionado en TG₁121845₁121829.pdf, 2016.
- [17] A. D. C. Díaz y E. M. C. Garzón, «Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café,» 2016.
- [18] E. J. A. Espinoza, «Diseño de un sistema automatizado para una tostadora de café con capacidad de 25 kg,» Tesis de mtría., Loja, Ecuador, 2022.
- [19] C. L. Meca, *Anatomía de la cereza del café*, online, 2025.
- [20] V. Belchior, *Anatomía de la cereza de café: ¿Qué es un grano de café?* Reino Unido, 2019.
- [21] S. S. Coffee, *Coffee Bean Anatomy: 101*, online, 2019.
- [22] C. E. Magnífico, *Los procesos del café: natural, semi-lavado y lavado*, online, 2025.

- [23] J. P. G. Rodríguez, F. Scotto, A. Cianferoni et al., *Manual básico del catador de café: Volumen 5, Tueste del café*. Quito, Ecuador: CEFA Ecuador, 2020.
- [24] N. Professional, *Propiedades del café verde y sus beneficios*, Vevey, Suiza, 2022.
- [25] D. B. Cárdenas, G. N. Mora y H. Corella, *Comparación del nivel de acidez del café preparado mediante tres métodos y dos niveles de tueste*, San José, Costa Rica, 2023.
- [26] NESCAFÉ, *Tipos de tostado de café*, Recurso digital oficial de la marca NESCAFÉ., Santiago de Chile, Chile, 2024.
- [27] B. N. España, *El proceso del café tostado*, Artículo técnico sobre el proceso industrial de tostado., Barcelona, España, 2021.
- [28] C. S. Guadalajara, *Tipos de tueste*, Guadalajara, México, 2024.
- [29] T. C. Roasters, *Tostado lento: características del proceso de tueste*, online, 2024.
- [30] SunFounder, *ESP32 Camera Extension: guía de uso del módulo de cámara*, online, 2024.
- [31] I. Mejía, *¿Qué es el ESP32?* México, 2023.
- [32] S. TC Medida y Control de Temperatura, *Termopar Tipo K – Información Técnica*, España, 2020.
- [33] S. TC Medida y Control de Temperatura, *Termopar Tipo K*, España, 2020.
- [34] SAWERS, *Módulo MAX31855K – Sensor de temperatura termopar tipo K*, Bolivia, 2025.
- [35] Ubuy, *Amplificador de termopar Fafeicy, módulo de termopar tipo MAX31855 K, sensor de temperatura de medición precisa 200 a 1350°C*, online, 2025.
- [36] H. D. AG, *Motor DC – Glosario*, Alemania, 2025.
- [37] U. Blue, *¿Qué es un Motor DC o Inverter?* España, 2022.
- [38] Novatronic, *BTS7960 Driver para motor DC 43A*, Ecuador, 2025.
- [39] A. SAS, *¿Qué es el acero 304?* Colombia, 2016.
- [40] Polimex, *Resistencias Tubulares para Calentamiento*, México, 2025.
- [41] J. D. Zuluaga, *Conoce la importancia de las tuercas y tornillos*, Colombia, 2021.
- [42] L. Brother Industries, *What Is a Lathe? How They Work and Their Features Explained*, Disponible en: <https://machinetool.global.brother/en-eu/speedio-navi/articles/a0042>, Nagoya, Japón, 2024.
- [43] B. Prototyping, *¿Qué es un torno? Tipos de máquinas, usos y diferencias*, Disponible en: <https://es.boyiprototyping.com/machining-guide/what-is-a-lathe/>, online, 2024.
- [44] Corsair, *Qué es una fuente de alimentación: explicación de las fuentes de alimentación*, online, 2025.
- [45] NovatronicEc. «Fuente de poder conmutada 12V 5A 60W.» (2025).
- [46] N. Mechatronics, *Imagen de convertidor de voltaje DC-DC Step-Down 3A LM2596*, Perú, 2025.
- [47] ElectronicEcuador. «Imagen de reductor de voltaje Step-Down 3A LM2596.» (2025).
- [48] P. Lucena, *¿Qué es la tecnología de la información?* México, 2022.
- [49] I. Fortinet, *What is OT Security?* Estados Unidos, 2025.
- [50] P. A. Networks, *What Is IT/OT Convergence?* online, 2025.
- [51] R. Automation, *Convergencia OT-IT en redes industriales*, online, 2023.
- [52] I. Digitalguide, *¿Qué es InfluxDB? Explicación, ventajas y primeros pasos*, Disponible en: <https://www.ionos.es/digitalg/tecnicas/que-es-influxdb/>, online, 2020.
- [53] Grafana, *Grafana – Platform for Business Intelligence and Visualization*, Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Grafana>, online, 2026.

- [54] JetBrains, *PyCharm – El IDE para desarrollo en Python*, Disponible en: <https://www.jetbrains.com/es-es/pycharm/>, online, 2026.
- [55] R. Hat, *What is Automation?* online, 2025.
- [56] G. P. S.A., *Tostadora de café: tipos de tostadoras*, online, 2023.
- [57] R. Roasters, *Máquina tostadora automática*, Turquía, 2024.
- [58] Fortinet, *What is the Internet of Things (IoT)? Benefits, Challenges Applications*, Estados Unidos, 2025.
- [59] B. T. Inc., *Blynk IoT Platform Overview*, online, 2025.
- [60] CATEDU, *¿Qué es Blynk?* online, 2022.