

# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO  
PARA EL PROCESO DE TOSTADO DE CAFÉ  
MEDIANTE UN CONTROL PID PARA REPLICAR DE  
FORMA PRECISA UN PERFIL DE TEMPERATURA  
EN UNA EMPRESA DEL SECTOR  
AGROINDUSTRIAL EN LIMA”**

**Tesis para optar al título profesional de:**

Ingeniero Mecatrónico

**Autores:**

Hector Manuel Simbron Guillen

David Jesus Suarez Sanchez

**Asesor:**

**Mg. Ing. Edgar André Manzano Ramos**

<https://orcid.org/0000-0002-8198-5619>

Lima - Perú

**2025**

## JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	<b>RUBEN QUISPE LLACCTARIMAY</b>
	Nombre y Apellidos

Jurado 2	<b>EDWIN HUBER CUADROS CAMPOSANO</b>
	Nombre y Apellidos

Jurado 3	<b>EDGAR ANDRE MANZANO RAMOS</b>
	Nombre y Apellidos

# Informe de Similitud






## 7% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

### Filtered from the Report

- ▶ Bibliography
- ▶ Quoted Text
- ▶ Small Matches (less than 10 words)

### Top Sources

- 6%  Internet sources
- 1%  Publications
- 3%  Submitted works (Student Papers)

### Integrity Flags

#### 0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.



“DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE TOSTADO DE CAFÉ MEDIANTE UN CONTROL PID PARA REPLICAR DE FORMA PRECISA UN PERFIL DE TEMPERATURA OBTENIDO DE UN PROCESO MANUAL EN UNA EMPRESA DEL SECTOR AGROINDUSTRIAL EN LIMA”

## DEDICATORIA

El presente documento está dedicado a mis padres, quienes con su amor y consejos nos dieron la motivación y fuerza necesaria para culminar este trabajo.

“DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE TOSTADO DE CAFÉ MEDIANTE UN CONTROL PID PARA REPLICAR DE FORMA PRECISA UN PERFIL DE TEMPERATURA OBTENIDO DE UN PROCESO MANUAL EN UNA EMPRESA DEL SECTOR AGROINDUSTRIAL EN LIMA”

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis docentes de la Universidad Privada del Norte por sus enseñanzas y guiarnos en nuestra formación profesional. A nuestro asesor, Mg. Ing Edgar Manzano Ramos quien nos brindó el conocimiento para la realización de esta tesis.

## Tabla de contenidos

JURADO EVALUADOR.....	2
Informe de Similitud.....	3
DEDICATORIA .....	2
AGRADECIMIENTO .....	3
RESUMEN .....	9
ABSTRACT.....	10
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
1.1. Realidad Problemática .....	11
1.2. Formulación del problema .....	13
1.2.1. Problemas Específicos .....	13
1.3. Objetivos .....	13
1.3.1. Objetivos General .....	13
1.3.2. Objetivos Específicos.....	14
1.4. Hipótesis.....	14
1.4.1. Hipótesis general.....	14
1.4.2. Hipótesis específicas.....	15
1.5. Justificación .....	15
1.5.1 Justificación práctica.....	15
1.5.2. Justificación valorativa.....	16
1.6. Antecedentes .....	16
1.7. Marco Teórico.....	18
1.7.1. La máquina tostadora de café y sus elementos esenciales .....	18
1.7.2. El ciclo de tostado del café.....	19
1.7.3. Tipos de máquinas de tostar café .....	21
1.7.4. Tipos de café más habituales en Perú .....	23
1.7.5. Perfil de Temperatura para el café .....	24
1.7.6. Sistema de control de Automatización con PLC.....	26
1.7.7. Software usado en el proyecto .....	28

<b>CAPÍTULO II: METODOLOGÍA .....</b>	<b>30</b>
2.1. Tipo de metodología .....	30
2.1.1. Enfoque de la Investigación.....	30
2.1.2. Alcance de la Investigación .....	30
2.1.3. Diseño de la Investigación .....	31
2.2. Población y muestra.....	31
2.2.1. Población .....	31
2.2.2. Muestra .....	32
2.3. Materiales, instrumentos y métodos .....	32
2.3.1. Enfoque de instrumentación de la maquina tostadora de café .....	33
2.3.2. Diseño de la maquina tostadora de café.....	33
2.3.3. Procedimiento de recojo de información .....	37
2.3.3.1. Determinación del parámetro a controlar para el proceso de tostado del café.....	37
2.3.3.2. Determinación del requerimiento de la maquina según el análisis de las curvas de temperatura.....	39
2.3.4. Tratamiento y análisis de datos.....	44
2.3.4.1. Selección de componentes, dispositivos y principio de instrumentación.....	44
2.3.4.2. Sistema de Control .....	54
2.3.4.3. Sistema de Automatización.....	57
 <b>CAPITULO III: RESULTADOS .....</b>	 <b>67</b>
3.1. Implementación de hardware, sensores y actuadores .....	67
3.1.1. Sensores y Actuadores .....	67
3.1.2. Pruebas de funcionamiento y calibración.....	74
3.1.3. Calibración y sintonización de Control PID .....	75
3.2. Validar el funcionamiento del sistema en base a los requerimientos.....	75
3.2.1. Pruebas de Marcha y Paro.....	81
 <b>CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>	 <b>83</b>
4.1. Discusión .....	83
4.1.1. Limitaciones.....	83
4.1.2. Recomendaciones.....	83
4.1.3. Conclusiones .....	84

“DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE TOSTADO DE CAFÉ MEDIANTE UN CONTROL PID PARA REPLICAR DE FORMA PRECISA UN PERFIL DE TEMPERATURA OBTENIDO DE UN PROCESO MANUAL EN UNA EMPRESA DEL SECTOR AGROINDUSTRIAL EN LIMA”

<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>86</b>
<b>CAPÍTULO V: ANEXOS .....</b>	<b>93</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de sistemas de control .....	27
Tabla 2. Partes mecánicas y electrónicas de la maquina tostadora de café.....	36
Tabla 3. Parámetros de tueste .....	38
Tabla 4. Tabla de los tipos de café para registrar parámetros .....	39
Tabla 5. Tabla de parámetros para controlar según maestro y Café .....	43
Tabla 6. Tabla de controlador de flama para la tostadora de café de tres modelos básicos.....	45
Tabla 7. Tabla de comparación de los principales tipos de sensores de flama .....	47
Tabla 8. Tabla de ventajas y desventajas según su tipo de sensor .....	49
Tabla 9. Tabla según su tipo de actuador.....	50
Tabla 10. Tabla de entradas y salidas .....	51
Tabla 11. Tabla de cantidad de entradas y salidas .....	52
Tabla 12. Tabla comparativa de especificaciones técnicas y costos .....	53
Tabla 13. Relación de las constantes PID y sus parámetros .....	56
Tabla 14. Respuesta de Control según la temperatura .....	57
Tabla 15. Dispositivos de Protección y cableado.....	66
Tabla 16. Valores registrados del Café Americano .....	76
Tabla 17. Valores registrados del Café Francés.....	78
Tabla 18. Valores registrados del Café Italiano .....	79

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. <i>Tostadora de tambor rotatorio</i> .....	22
Imagen 2. <i>Tostadora de café de lecho fluido</i> .....	23
Imagen 3. <i>Vista lateral de la maquina tostadora de café</i> .....	34
Imagen 4. <i>Vista frontal de la maquina tostadora de café</i> .....	35
Imagen 5. <i>Niveles de tueste</i> .....	38
Imagen 6. <i>Perfil de curva de temperatura de café americano</i> .....	40
Imagen 7. <i>Perfil de curva de temperatura de café francés</i> .....	41
Imagen 8. <i>Perfil de curva de temperatura de café italiano</i> .....	42
Imagen 9. <i>Comparativo de sensores de temperatura</i> .....	44
Imagen 10. <i>Quemador modelo VG 10</i> .....	46
Imagen 11. <i>Plano de Control</i> .....	63
Imagen 12. <i>Plano de Fuerza</i> .....	64
Imagen 13. <i>Motor principal</i> .....	67
Imagen 14. <i>Sistema de transmisión</i> .....	68
Imagen 15. <i>Sistema de ventilación</i> .....	69
Imagen 16. <i>Estructura mecánica</i> .....	69
Imagen 17. <i>Quemador de gas</i> .....	70
Imagen 18. <i>Sensores de Temperatura</i> .....	71
Imagen 19. <i>Controlador de flama</i> .....	72
Imagen 20. <i>Sensor de flama</i> .....	72
Imagen 21. <i>Actuadores</i> .....	73
Imagen 22. <i>PLC (Controlador lógico programable)</i> .....	74
Imagen 21. <i>Proceso Manual vs Proceso automático (CA)</i> .....	77
Imagen 22. <i>Proceso Manual vs Proceso automático (CF)</i> .....	79
Imagen 23. <i>Proceso Manual vs Proceso automático (CI)</i> .....	80
Imagen 24. <i>Proceso Manual vs Proceso automático</i> .....	82

## RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo automatizar una máquina tostadora de café en una empresa para el sector agroindustrial en Lima, y desarrollar un dispositivo electrónico que se encargue de apoyar al operario en administrar parámetros como tiempo para tostar, velocidad de ventilador, temperatura, entre otros.

Se centró en la automatización del proceso de tostado de café, para un control más preciso como temperatura y tiempo, sobre todo, que el café se tueste de forma más eficiente, buscando mejor calidad y consistencia del café.

Este estudio será subdividido en tres partes: el sistema mecánico; en donde se explicará sobre los materiales de estructura de la máquina, motores, y los mecanismos de transmisión de movimiento, el sistema electrónico; que mostrará los circuitos de motores y equipos, la programación; que tratará del software, interfaz y código fuente de funcionamiento, obteniendo un sistema inteligente que permita interactuar con el operario de forma más eficiente. Este dispositivo permitirá reducir los errores que se producen cuando se tuesta café, tales como quemar, sobre cocción o falta de temperatura. Por ello, sería de gran ventaja para las empresas del sector agroindustrial de Lima querer implementar esta tecnología en sus máquinas.

Palabras claves: Sector agroindustrial, tostadora de café, automatización, control.

## ABSTRACT

The purpose of this thesis is to automate a coffee roasting machine in an agro-industrial company in Lima and to develop an electronic device that supports the operator in managing parameters such as roasting time, fan speed, temperature, among others.

It focuses on automating the coffee brewing process, allowing for more precise control of temperature and time, and above all, ensuring the coffee is produced in a more efficient format, with maximum coffee quality and consistency.

This study is subdivided into three parts: the mechanical system, which will explain the machine's structural materials, motors, and motion transmission mechanisms; the electronic system, which will show the motor and equipment circuits, and the programming; the software interface, interface, and code are functional, providing an intelligent system that allows you to interact with the operation in a more efficient way. This device allows you to reduce the errors you make when making coffee, such as overcooking or low-temperature errors. Therefore, it would be of great benefit to companies in the agro-industrial sector in Lima to consider implementing this technology in their machines.

Keywords: Agro-industrial sector, coffee roasting, automation, control.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad Problemática

En los últimos años, las empresas peruanas del sector agroindustrial han experimentado un notable crecimiento, alcanzando mayores estándares de calidad en el ámbito agrícola. Algunos de estos cultivos orgánicos que producen estas empresas son el cacao, la quinua, la maca, la palta y el café, siendo este último el tercer producto más importante seguido de la uva y la palta, además el Perú es el noveno productor de café convencional y a nivel mundial se posiciona en el puesto siete como exportador de café (Cámara Peruana del café y Cacao, 2017).

Para la producción de café, se requiere pasar por al menos siete fases, como la plantación, cosecha, procesamiento, descascarado, tueste, molido y preparación. De todas estas, el tostado es crucial, pues en esta transforma sus propiedades físicas y obtiene el sabor y aroma, que lo hacen consumible (Rincones, 2017). En esta fase, también es conocido como torrefacción, y se busca elevar la temperatura del café, según Gamboa et al. (2008), esta se define como uno de los procesos industriales clave en la producción del café, debido a que desarrolla y libera sus características sensoriales.

Según la Asociación de Cafés Especiales de América (SCAA), ha estandarizado un sistema de puntos que clasifica el tostado según el color del grano. Este color se especifica mediante la medición del reflejo de luz con la inspección visual de la persona, quien hace la comparación del grado de tostado con un color patrón. El gradiente cromático de tueste tiene una escala que varía desde el 95 hasta el 25, representando el tueste más claro y oscuro,

respectivamente (Saballos, 2018). Además del cambio de color que presenta el café, este genera distintos olores y sabores dependiendo de la temperatura que se le asigne, es decir, si se le proporciona cien grados centígrados, entonces el grano de café empezaría a tener color amarillo, si este es 120 a 140 grados centígrados, este libera vapor de agua y olor a tostado que generaría un color castaño, si es de 150 a 190 grados centígrados, desprende dióxido de carbono y monóxido de carbono, el cual el grano se visualiza de color marrón oscuro y aumenta el tamaño del grano, siendo este la fase final del café tostado (Saballos, 2018). Uno de los desafíos en la tostación es establecer con precisión las condiciones ideales de tiempo y temperatura que permitan obtener perfiles consistentes y replicables, con el fin de mejorar un sabor único y atractivo para el consumidor de café. (Campo, 2019). Los tiempos finales del proceso de tostado de café varía en un rango de 8 a 20 minutos, determinados por el color del grano tostado según los estándares de la escala AGTRON/SCA (Valentina, 2021).

Para mejorar la calidad del café, existen tecnologías que pueden influir directamente en el control de estos parámetros. Actualmente, el método más utilizado es un tostador cilíndrico, en el que los granos giran continuamente hasta alcanzar el punto de tostado deseado. Los tostadores automáticos poseen más ventajas en comparación con los tostadores manuales. Con el desarrollo de la tecnología, la tostación ahora se puede realizar con una máquina (Wibogo, 2022). La producción diaria sobrepasa la capacidad máxima de la tostadora, lo que requiere repetir este proceso múltiples veces, los operadores humanos pueden enfrentar dificultades en la precisión al realizar perfiles o curvas de tostado, lo que puede afectar la consistencia del producto. Una máquina automática garantiza una mayor precisión y eficiencia en el proceso, optimizando la producción y reduciendo los posibles errores. (Momotus, 2021).

Es así que se desea automatizar el control de temperatura del perfil de tostado del café, lo que es fundamental para asegurar la calidad y consistencia de su producto.

## **1.2. Formulación del problema**

- ¿Cómo controlar el proceso de tostado de café para replicar de forma precisa un perfil de temperatura en una empresa del sector agroindustrial en Lima?

### **1.2.1. Problemas Específicos**

- ¿Cómo determinar los parámetros a controlar en el proceso de tostado de café?
- ¿Cómo determinar el requerimiento del sistema automatizado de proceso de tostado de café?
- ¿Cómo seleccionar los sensores, actuadores y módulos de control para el sistema automatizado?
- ¿Cómo diseñar el controlador PID del sistema automatizado?
- ¿Cómo diseñar el sistema de automatización para el proceso de tostado de café?
- ¿Cómo implementar y calibrar el sistema de control automático?
- ¿Cómo validar el sistema automático?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivos General**

Desarrollar un sistema automatizado para el proceso de tostado de café mediante un control PID para replicar de forma precisa un perfil de temperatura en una empresa del sector agroindustrial en Lima.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Identificar los parámetros asociados al proceso de tostado del café y determinar el parámetro a controlar.
- Analizar las curvas de temperatura requeridas para el proceso de tueste para determinar el requerimiento del sistema.
- Seleccionar los sensores, actuadores y módulos de control requeridos para el sistema de control automático.
- Diseñar el controlador PID.
- Diseñar el sistema de automatización para control de temperatura en el proceso de tostado de café.
- Implementar y calibrar el sistema de control automático para el control de temperatura, llevando a cabo las pruebas de acuerdo a perfiles de tostado.
- Validar el funcionamiento del sistema en base a los requerimientos.

## 1.4. Hipótesis

### 1.4.1. Hipótesis general

Mediante la automatización de un proceso de tostado de café utilizando control PID, se podrá replicar de forma precisa un perfil de temperatura en una empresa del sector agroindustrial en Lima.

### **1.4.2. Hipótesis específicas**

- Identificando los parámetros asociados al proceso de tostado de café se podrán determinar cuáles se deben controlar.
- Mediante el análisis de curvas de temperatura se determinará el requerimiento del sistema automatizado.
- Mediante comparación de equipos se seleccionarán los sensores, actuadores y módulos de control.
- Mediante sintonización y análisis se determinan los parámetros PID del controlador.
- Determinando la lógica de control del sistema y planificando su implementación se diseñará el sistema de automatización.
- Llevando a cabo de pruebas de acuerdo a perfiles de tostado se implementará y calibrará el sistema de control automático
- Comparando en base a los requerimientos se validará el sistema de control automático.

## **1.5. Justificación**

### **1.5.1 Justificación práctica**

Da conocer que la investigación, en una línea de producción de una empresa es de importancia a ser eficiente con el tiempo, mano de obra y el uso de la materia prima. Por esta razón, el objetivo de la máquina automática tostadora de café es generar ganancias con la implementación de la automatización en su proceso de control de la temperatura de acuerdo con un perfil de tostado.

### 1.5.2. Justificación valorativa

Razones que sustentan en el diseño de la máquina automática tostadora de café es motivar aquellas empresas que buscan mejorar la funcionalidad, calidad y eficiencia del producto final que es el café tostado, innovando para atraer un público más amplio y sobre todo puede resultar una reducción de costos operativos en la empresa.

### 1.6. Antecedentes

A continuación, se presentan los antecedentes que han aplicado un diseño de máquina automatizada, en la cual se menciona algunas tesis y/o artículos científicos.

**Tafur (2022).** En su investigación de suficiencia profesional para optar al título de Ingeniero en Industrias Alimentarias en la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, titulada “*Automatización de procesos en la Industria Alimentaria*”, tuvo como objetivo analizar e implementar sistemas de automatización en diversas etapas de la producción de alimentos para optimizar la eficiencia, reducir el margen de error humano y mejorar la calidad del producto final. Su estudio abordó el uso de controladores lógicos programables (PLC), sensores de temperatura y humedad, así como estrategias de monitoreo en tiempo real para garantizar procesos más estandarizados y reproducibles en la industria alimentaria. Además, destacó los beneficios de la automatización en la reducción de costos operativos y en el cumplimiento de normativas de calidad e inocuidad alimentaria.

**Smith (2022).** Es una investigación con el propósito de obtener el título de Ingeniero Mecánico, titulada *"Redesign and Optimization of a Small Coffee Roasting Machine"* de la Universidad de los Andes. Este estudio tuvo como objetivo analizar y mejorar el diseño de una máquina tostadora de café de tamaño pequeño, enfocándose en la optimización de los principales fenómenos de transferencia de calor y masa durante el proceso de tostado. Para ello, se implementaron modelos computacionales que permitieron evaluar el impacto de diferentes parámetros en la eficiencia térmica del sistema. Con el avance de la tecnología y la integración de nuevos materiales y métodos de simulación, estos diseños han evolucionado hacia sistemas más eficientes y precisos. Un ejemplo de esta evolución es la incorporación de algoritmos de control avanzados, que permiten un ajuste más preciso de la temperatura y el tiempo de tostado, mejorando así la calidad del café tostado y reduciendo el consumo energético.

**Rojas (2019).** En su investigación con el propósito de obtener el título de Ingeniero Electrónico, titulado *“Diseño de un sistema automatizado basado en lógica difusa para el proceso de tueste de café en la empresa momotus cade S.A.S”* de la Corporación Universitaria Autónoma de Cauca, tuvo como objetivo principal el diseño de una máquina automatizada que optimizara el proceso de tostado mediante la implementación de un sistema de control basado en lógica difusa. Su estudio abordó la caracterización del proceso de tueste, la identificación de los parámetros clave que afectan la calidad del café y el desarrollo de un controlador capaz de ajustar dinámicamente la temperatura y el tiempo de tostado. A través de la automatización, se buscó reducir la intervención manual, mejorar la precisión en la curva de tostado y garantizar la homogeneidad del producto final.

## 1.7. Marco Teórico

En la **Base Teórica** de la presente investigación, para brindar mayor solidez del conocimiento previo y proporcionar un marco de análisis, con diversos artículos y/o tesis, se explican los fenómenos relacionados con el tema de estudio.

### 1.7.1. La máquina tostadora de café y sus elementos esenciales

Las máquinas de tostado son básicas para el proceso, en sus diferentes tipos, métodos y características. Una de ellas es la tostadora de tambor, diseño simple que permite un control de tiempo y temperatura, donde se utiliza un tambor giratorio que calienta los granos de manera uniforme con capacidad de tostar lotes grandes, pero requiere disposición del maestro tostador para ajustar los parámetros de tueste.

**Gómez, J. (2021).** Hace mención, que cada máquina tostadora de café requiere una serie de componentes esenciales para su adecuado funcionamiento, siendo los siguientes:

- A. **Tambor de tostado.**– Es el elemento principal donde se ejecuta el proceso del tostado. Cabe resaltar, que las características del tambor influyen en el rendimiento de otros componentes de la máquina.
- B. **Tambor de enfriado.**– Este componente sirve para el enfriado del café. Es decir, el flujo natural del aire en movimiento constante. Por otro lado, las máquinas de mayor tamaño son asistidas por un ventilador.
- C. **Componentes motrices.**– Es referente a los motores eléctricos, ya que, estos son influyentes en el movimiento necesario para la rotación de las partes móviles de la máquina.

- D. Sistema de transmisión.**– Es lo que conecta los elementos motrices con las partes móviles de la máquina, pudiendo considerar engranajes, correas, entre otros mecanismos, mucho va depender del diseño de cada máquina.
- E. Fuente de calor.**– Es la proporción de temperatura acorde al proceso del tostado requerido. A parte, hacen uso de quemadores de gas o resistencias de tubo de silicio para cumplir la función.
- F. Estructura de soporte.**– Este elemento brinda estabilidad y soporte a toda la máquina; ya que, está fabricado de acero, diseñado para su montaje y desmontaje.
- G. Carcasa o recubrimiento exterior.**– Es lo más notable de la máquina, por lo general logra un mejor acabado con un pintado y puede estar fabricado de plástico o aluminio debido a la ligereza.
- H. Sistema de control y seguridad.**– Cada máquina debe estar equipada con un mínimo de dispositivos de control y seguridad, dependiendo del diseño implica el sistema.
- I. Tolva.**– No es un elemento esencial, pero su uso implica un mejor almacenaje del café antes del tostado.

### 1.7.2. El ciclo de tostado del café

Al hacer referencia al tostado del café, que influye en diversos factores como la *variedad*, que depende del tiempo del grano en el tostador, la *humedad* que influye directamente con la temperatura y el *sabor* del café ligeramente ácido que se desarrollará durante la pirolisis; es decir, la descomposición térmica del ácido clorogénico con el café verde, este genera fenoles y la descomposición al sabor ácido. (Sánchez, Del Ángel, & Juárez, 2020)

Este proceso implica diversas etapas desde la transformación de los granos de café verdes hasta en granos tostados, afectando el sabor, su aroma y características específicas del café, detallando el funcionamiento general en lo que consiste un ciclo de tostado.

**Ayala, E. (2022).** Precisa un enfoque general de las tres etapas esenciales en el ciclo tostado de granos de café, como el secado, tostado y enfriado. El cuidado en los detalles de cada etapa juega un papel relevante para lograr un café de alta calidad.

### **1º Etapa del secado:**

- Consiste en la preparación de los granos de café, seleccionar los de mejor calidad, luego pesarlos y determinar la cantidad a tostar.
- Tener en cuenta que los granos se van introducir en la máquina tostadora bajo un sistema de control manual.
- Se realiza el precalentamiento del cilindro (5 minutos aproximadamente) antes de introducir el café; ahí mismo se abrirá la compuerta de entrada de la tolva hacia el cilindro (rotativo).
- Posteriormente, se realiza el llenado de la tolva con la cantidad del café requerido, se verifica el límite de la capacidad y se procede a programar la curva del tostado, controlando las posibles tonalidades desde el panel de la máquina.

### **2º Etapa de tostado:**

- La temperatura ocasionará cambios físicos y químicos en el grano del café, originando una variación en el sabor y aroma, para ello, se controlará el tiempo para un adecuado y homogéneo tostado.

- El tiempo depende de diversos factores como el tipo de curva optada, el operario y la presión del gas, logrando un cambio de tonalidad de grano de café.
- Cuando se observa que los granos de café van tomando matiz, aroma y sobre todo liberan vapor de agua provocando ligeros sonidos, se determina que el tostado ha culminado.

### 3º Etapa de enfriamiento:

- Una vez obtenido el grado de tostado deseado se apaga la llama y se abre la compuerta del cilindro rotativo para apagar el motor, ahí empieza a descender la temperatura a valores por debajo de los 200°C.
- Por último, se procede a abrir la compuerta/apertura del tambor para extraer el café tostado que será el producto final.

### 1.7.3. Tipos de máquinas de tostar café

La teoría del café tostado y las máquinas que implican en el proceso componen ciencia y tecnología; es decir, el proceso del tostado de café está basado en una transformación química y con niveles de tostado, el control del proceso, máquina de tostado por su tipo, tecnología y control e impacto en el sabor. Es por ello, que existe diversos tipos de máquinas tostadoras del café para las preferencias y necesidades de cada cliente.

**Rojas, D. (2021).** Determina el proceso de tueste de café en sus diferentes máquinas tostadoras, con características específicas basadas en los requerimientos de la empresa, que son las siguientes:

A. **Tostadora de tambor rotatorio.**- Esta máquina se basa en tostar café en el tambor rotatorio por su método tradicional, bajo un sistema manual a cargo de un operador tostador. Este permite la transferencia de calor de manera directa que ocurre con el cilindro giratorio y un aumento en la superficie del contacto con los granos del café, para lograr una homogeneidad al tostar los granos.

### Imagen 1.

*Tostadora de tambor rotatorio*



*Fuente: Rojas, D. (2021)*

B. **Tostadora de lecho fluido.**- Esta máquina brinda una corriente de aire que fluya a través de los granos de café durante el proceso de tueste, provocando la fluidización; ya que, la mayoría de equipos con similar tecnología tienen un diseño para llevar un control adecuado de tiempo y temperatura. Es decir, la temperatura de aire logra alcanzar un valor predeterminado, con un sistema de control que puede interrumpir

el calentamiento y desactivar la resistencia, con la introducción de agua.

## Imagen 2.

*Tostadora de café de lecho fluido*



*Fuente: Rojas, D. (2021)*

Uriarte, B. & Gómez, M. (2024). Precisan que estas máquinas brindan una capacidad de producción idónea para adecuarse a diversas escalas de operación. Además, su capacidad de programación se ajusta de manera sencilla a los perfiles de tostado conforme a las especificaciones por lote, para una mejora en el producto.

### 1.7.4. Tipos de café más habituales en Perú

El café es uno de los productos vegetales más importantes dentro del comercio internacional global y actualmente se produce café en distintas regiones. Cabe mencionar, que el café es una de las bebidas más consumidas en todo el mundo, y es importante contar con un proceso industrializado, así se evita defectos del grano, en su procesamiento y sobre todo se busca

que el producto sea competitivo en el mercado, satisfaciendo al gusto del consumidor.

**García, P. & Barreto, D. (2007).** Explican sobre los cuatro tipos de café que se producen en Perú, siendo los siguientes:

- **Café convencional.-** Son los café comunes, procesados de manera tradicional y su comercialización son con un 20% de humedad.
- **Café Premiun.-** Más conocidos como los café convencionales, que provienen de cosecha selectiva, ya que, se fermenta de 12 a 18 horas aproximadamente y su comercialización son con un 12% a 13% de humedad.
- **Café especiales.-** Se caracterizan por su calidad y lugar de origen; ya que, son producidos y cosechados, bajo estándares garantizado, lo que marca la diferencia en el precio con un café convencional. En esta misma línea podemos resaltar los café gourmet, café orgánicos, los café comerciales, café de origen, entre otros.
- **Café descartes.-** Denominados también como “café de descarte”, porque presentan ligeros defectos y son remanentes del proceso de exportación, destinados para el consumo interno.

### 1.7.5. Perfil de Temperatura para el café

En efecto, el perfil de temperatura ante el proceso de tostado de café tiene impacto en el sabor y aroma, como producto final, depende mucho del tipo de máquina y método de tostado. Asimismo, la variedad del grano responde distinto en el proceso para cada uno. Es decir, que algunos granos pueden tener un tueste más ligero, otros un tueste oscuro, influyendo en la percepción del sabor final. (Porrás, Vargas, Araúz, & Abarca, 2019) Por ende, el grado del

tueste es de suma relevancia para determinar características en cuanto al sabor de los extractos posterior a la elaboración del café tostado; en efecto, al asociar el grado y velocidad de tueste se denomina café de alta calidad.

**Uriarte, B. & Gómez, M. (2024).** Precisan el procedimiento del tostado en sus diversas fases, siendo las siguientes:

- **Desecación.-** Dado en el punto de ebullición del agua, por lo se convierte en vapor libre y genera presiones internas, donde los granos toman una tonalidad verdoso pálido a un matiz amarillento.
- **Caramelización.-** Consiste en la fusión del azúcar. Es decir, fructosa a 128°C, glucosa de 146 °C a 150°C y sacarosa 186°C, generando la reacción Maillard, para una adecuada preparación de los compuestos.
- **Transición térmica.-** Es la fase inicial de cocción del grano, conocido como el primer crack, esto desencadena reacciones químicas complejas y notable por un ligero sonido. En este punto del proceso, el tamaño original varia e incrementa, logrando alcanzar a un 100% con una tonalidad marrón.
- **Fase de pausa.-** En este punto se disuelve el sonido y la reacción química permanece, esta pausa es asociada por la intensidad del calor que emana de la máquina tostadora.
- **Desarrollo del grano.-** Da inicio al proceso del tueste, por su notable desarrollo y brillo del grano del café. Cabe mencionar, que el resalte de la tonalidad del café, con una pérdida de peso de aproximadamente 13%, es por la liberación de gases. Asimismo, se irá percibiendo sonidos “crujientes”, denominada esta acción como el segundo crack, al cual conduce a la deshidratación del grano de café.

- **Acabado y enfriamiento.-** En el último paso, el grano experimenta cristalización, logrando el sello de los poros del grano, por ende, se encapsula los aromas y sabores en su interior.

Si bien, la temperatura es el parámetro de mayor relevancia en el proceso de tueste de café, otros que influyen son el flujo de aire y la velocidad del tambor que deben ser ajustados acorde a las características del lote solicitado por el cliente; ello conduce a la necesidad de avalar un control más preciso y uniforme del perfil térmico.

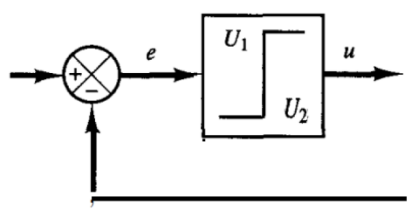
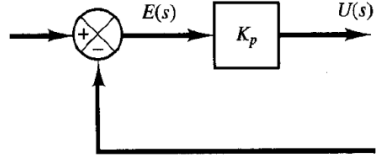
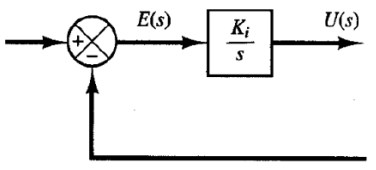
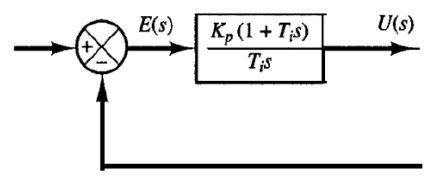
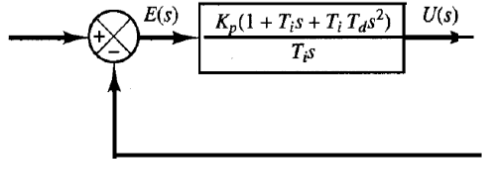
#### **1.7.6. Sistema de control de Automatización con PLC**

La automatización de una máquina tostadora de café haciendo uso de un controlador lógico Programable (PLC), ayuda a mejorar en la eficiencia y da un mayor control del proceso de tueste del café, valorando los requisitos de control que actúan conforme a los comandos en sus entradas y salidas.

**Quijada, V. & Ccencho, M. (2024).** Mencionan que las variables de salida proceden conforme a las variables de entrada. Es decir, en un sistema de control lazo abierto, no capta la información sobre el valor de la variable del proceso o dicho producto, son sistemas simples pero dependen de calibración. Por otro lado, el sistema de control lazo cerrado tiene el poder de captar información respecto a la variable que está controlando; siendo denominados como sistemas de control de retroalimentación y automatizados, lo que permitirá tomar decisiones sin intervención humana y confiere estabilidad ante perturbaciones o cambios que se presenten. Siendo importante, mencionar los distintos tipos de sistema de control.

**Tabla 1.**

*Tipos de sistemas de control*

SISTEMAS DE CONTROL			
TIPOS	DESCRIPCIÓN	FÓRMULA	EXPRESIÓN GRÁFICA
Control ON/OFF	Sistema de control que interviene dos estados, conocidos como encendido y apagado, control de aplicación simple, llevado en sectores industriales como domésticos. En dicho contexto, el signo o alerta de error se representará como $e(t)$ y la de salida como $u(t)$ .	—	 <p><i>Nota.</i> De “Ingeniería de control moderna”, por Ogata, 1998.</p>
Control Proporcional	Sistema de control proporcional, tiene relación entre la señal de salida de control $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ , dado a través de un amplificador de ganancia ajustable conocido como $K_p$ .	<p>Donde:  <math>U(s)</math>: Salida del controlador  <math>E(s)</math>: Señal de error  <math>K_p</math>: Ganancia proporcional</p> $\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$	 <p><i>Nota.</i> De “Ingeniería de control moderna”, por Ogata, 1998.</p>
Control Integral	También conocido como control de reajuste, donde la señal de control de salida $u(t)$ es cambia proporcionalmente a la señal de error $e(t)$ de cero, donde el valor $u(t)$ se conserva estable.	<p>Donde:  <math>K_i</math>: Ganancia integral</p> $\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$	 <p><i>Nota.</i> De “Ingeniería de control moderna”, por Ogata, 1998.</p>
Control PI	Dado como controlador proporcional e integral (PI), aplica en función de transferencia.	<p>Donde:  <math>T_i</math>: Tiempo integral  <math>K_p</math> y <math>T_i</math> son datos ajustables, donde <math>T_i</math> es el tiempo integral que regula la operación del control integral y <math>K_p</math> es la ganancia proporcional. La velocidad de reajuste es determinada por la inversa del tiempo integral. Por cada, esta velocidad es la cantidad por minuto en la que se duplica la parte proporcional. Asimismo, se mide en repeticiones por minuto (Ogata, 1998).</p> $\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$	 <p><i>Nota.</i> De “Ingeniería de control moderna”, por Ogata, 1998.</p>
Control PID	Sistema de control Proporcional-Integral-Derivativo (PID), une todas las ventajas de acciones.	<p>Donde:  <math>T_d</math>: Tiempo derivativo</p> $\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$	 <p><i>Nota.</i> De “Ingeniería de control moderna”, por Ogata, 1998.</p>

*Fuente: Quijada, V. & Ccencho, M. (2024)*

Es así que, cuando hacemos referencia al control PID (Proporcional-Integral-Derivativo), se hace uso en el proceso térmico del tostado de café; ya que, permite mantener una temperatura estable y tiene la capacidad de corregir desviaciones. Es por ello, que al implementarse el Control PID, la configuración del controlador debe cumplir con ciertos parámetros y deben ser ajustados para la optimización del sistema, permitiendo programar para diversos perfiles de tostado en sus distintos tipos de granos y con una temperatura acorde, la calidad del café tostado mejora, logrando un mejor aroma y sabor, con resultados consistentes.

#### **1.7.7. Software usado en el proyecto**

Consideramos que el software idóneo para la programación y configuración en los sistemas de automatización industrial es TIA Portal (Totally Integrated Automatin Portal); ya que integra diferentes productos de SIMATIC, lo que nos permitirá aumentar la productividad y durante el proceso lograr eficiencia. (Montalvo & Morocho, 2011)

Considerando que el TIA Portal ofrece una serie de ventajas, como la gestión conjunta de datos, manejo unitario de programas, datos de configuración y visualización, como configuración y diagnóstico por gráfico. En cuanto a sus versiones han ido variando desde su lanzamiento como la TIA Portal V12, lanzada en 2012, este alojo un interfaz de usuario mejorado con nuevas funcionalidades, en cuanto a la TIA Portal V18 lanzada en 2022, con una mejor integración del sistema y más herramientas. Por otro lado, los requisitos mínimos para un sistema operativo es contar con un procesador Intel Core i5, con una memoria RAM recomendable de 8GB o más para un mayor rendimiento óptimo. Asimismo, el espacio de disco duro debe contar con un espacio

libre de al menos 10 GB a 20 GB.

Por ende, los recursos para el uso de una máquina tostadora de café que utiliza TIA Portal para la automatización con el objetivo de garantizar el funcionamiento eficiente al programar o configurar es:

- Computadora de escritorio, con procesador moderno Intel i5 y para mejor funcionamiento i7, y con una memoria RAM 8GB
- En cuanto al Sistema de almacenamiento, debe contar con disco duro SSD
- Puertos USB y Ethernet para mejor acceso y conexión de dispositivos de automatización
- Es importante validar un sistema de respaldo para la protección y resguardo de datos.

## CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

### 2.1. Tipo de metodología

#### 2.1.1. Enfoque de la Investigación

El presente estudio sigue un **enfoque cuantitativo**, que implica recopilación y análisis de datos numéricos, evaluando el desempeño del sistema de control de temperatura de una máquina tostadora de café.

Según Jiménez (2020), precisa que, *“actualmente la investigación con enfoque cuantitativo basado en observación y análisis de hechos, son desarrollados mediante técnicas numéricas para lograr mayor certeza en los resultados”*. Es decir, los estudios buscan confirmar y conjeturar los fenómenos investigados y en nuestro caso, mediremos variables como la temperatura, el tiempo de tostado y la estabilidad del control PID, que nos permite un análisis objetivo.

#### 2.1.2. Alcance de la Investigación

Para este estudio, lo plasmaremos como **alcance de tipo explicativo**, ya que se busca comprender y demostrar la relación entre el sistema de control PID y la estabilidad térmica del proceso de tostado de café.

Según Ramos (2020), *“el alcance de la investigación en cuanto a la determinación de los fenómenos busca una explicación, basado en ecuaciones estructurales para la comprensión de dicho fenómeno”*. En este caso, nos permite determinar la configuración del control PID que influye en la calidad del tostado, proporcionando una base para optimizar el proceso y mejorar su eficiencia.

### 2.1.3. Diseño de la Investigación

Respecto al diseño de la investigación es **experimental descriptiva**, nos permite observar y documentar la manipulación de variables, ya que al hacer referencia a lo *experimental* justifica la manipulación de variables en un entorno controlado, como la temperatura y el tiempo de tostado, para que sea evaluado en efecto el perfil de tostado del café. Asimismo, en lo *descriptivo* se evalúa el comportamiento del sistema de control de temperatura en la máquina tostadora de café con pruebas experimentales, analizando y documentando el desempeño del sistema de control PID en condiciones reales de operación, con un impacto en la estabilidad térmica del proceso de tostado, a fin de determinar la eficiencia del modelo implementado.

Según Guevara, Verdesoto, & Castro (2020), mencionan que, *“se considera exitosa una investigación experimental cuando el investigador confirma que el cambio de la variable dependiente es dada por la manipulación de la variable independiente. Donde se establece la causa y efecto del fenómeno, esto quiere decir que los efectos observados se deben a la causa”*.

## 2.2. Población y muestra

### 2.2.1. Población

Según Vizcaíno, Cedeño y Maldonado (2023), la población se refiere al conjunto de elementos que comparten características relacionadas con el objeto de estudio. En esta investigación, la población está conformada por los distintos tipos de tostado de café comercializados en el Perú, tales como el canela, claro, medio (americano), medio-oscuro (vienés), oscuro (francés), italiano, espresso y turco, los cuales presentan características sensoriales

particulares. Este estudio evalúa el desempeño de un sistema automatizado de control PID, examinando el perfil de un tipo de café a partir de sus características físicas y del tipo de tostado aplicado.

### **2.2.2. Muestra**

La muestra se seleccionó de manera no probabilística, del cual se realizaron varias pruebas experimentales con diferentes configuraciones del sistema PID. Para evaluar su desempeño en distintos perfiles de tostado, se trabajó con tres tipos de tostado de café: tostado americano, tostado francés y tostado italiano, lo que permitió analizar la variación en los parámetros de temperatura en lo que puede afectar el resultado final de cada tipo de tostado.

Según Arias & Covinos (2021), definen que, *“La muestra es un subconjunto selecto de individuos, eventos extraídos de una población total, con el fin de estudio y poder hacer interferencia con dicha población”*.

### **2.3. Materiales, instrumentos y métodos**

En esta sección se describe el diseño y simulación de una máquina tostadora de café, capaz de ajustar automáticamente el proceso de tostado para seguir un perfil específico de temperatura. Su objetivo es optimizar el tostado de los granos de café, detectando y corrigiendo de manera autónoma cualquier desviación en la curva de tostado predefinida. Esto se logra mediante un sistema de control avanzado que monitorea la temperatura en tiempo real y ajusta los parámetros de calor para garantizar un tostado uniforme y de alta calidad.

### **2.3.1. Enfoque de instrumentación de la máquina tostadora de café**

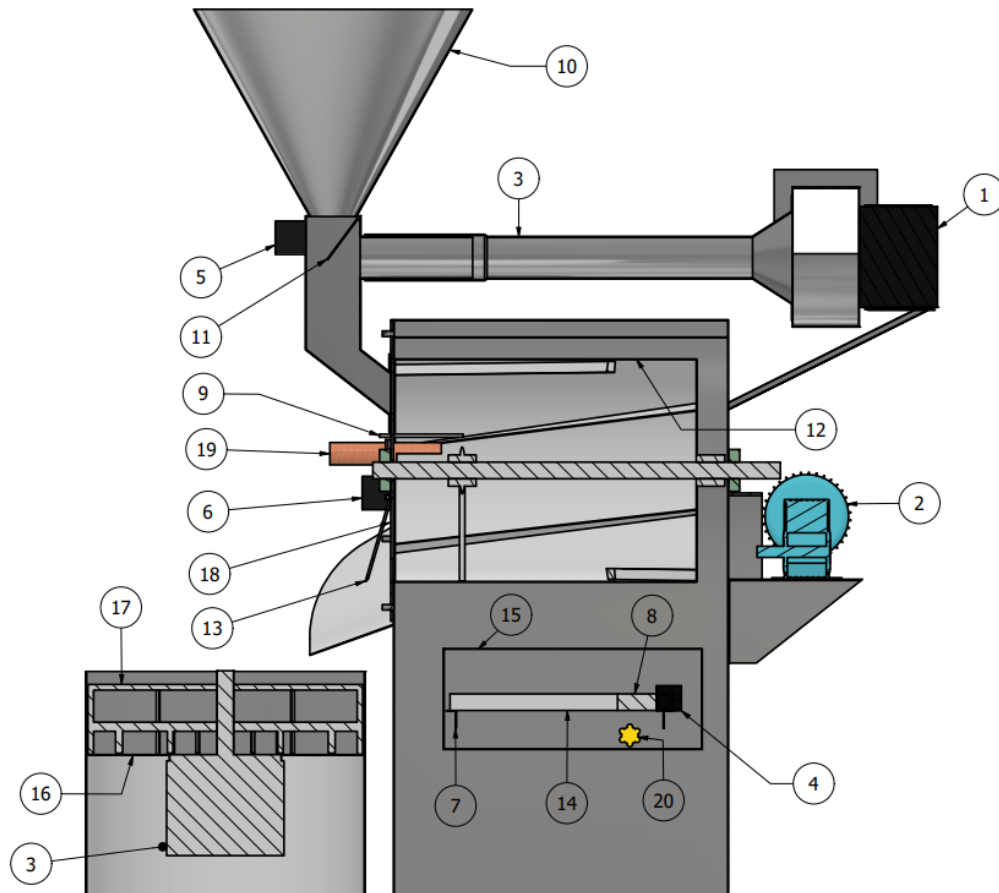
El diagrama del sistema mecatrónico de la máquina tostadora de café, proporciona una visión clara y detallada de la organización y la interacción de sus componentes. En la parte superior derecha del diagrama se encuentra el sistema mecánico, seguido a su derecha por el sistema eléctrico, mientras que en la parte inferior se sitúan el sistema electrónico junto al sistema de control de temperatura. Finalmente, en el lado derecho del diagrama, se presenta una representación gráfica de la máquina tostadora.

### **2.3.2. Diseño de la máquina tostadora de café**

En este diseño se presenta una vista general que facilita la identificación de los actuadores, sensores y las distintas etapas del sistema propuesto. Se muestra un enfoque específico en la sección de cocción de la máquina tostadora de café, destacando los elementos relacionados con la generación y control del calor, como los calentadores, termostatos y sensores de temperatura. La imagen 3 está dividida para ofrecer una vista interna y observar detalladamente el funcionamiento interno del sistema de cocción.

### Imagen 3.

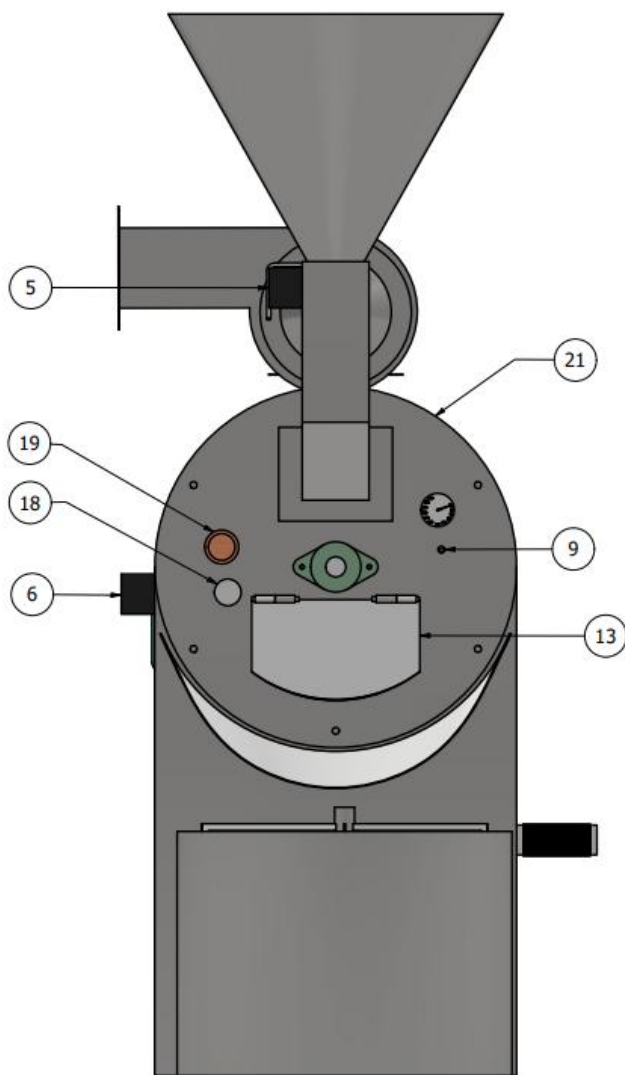
*Vista lateral de la maquina tostadora de café*



En la imagen, se ilustra la vista lateral de la máquina tostadora, destacando las áreas de entrada y salida del café. En esta representación panorámica se señalan las partes claves del proceso de tostado, como las tolvas de carga y descarga, así como los mecanismos de transporte del café antes y después de la cocción.

**Imagen 4.**

*Vista frontal de la maquina tostadora de café*



A continuación, se describen detalladamente todas las partes enumeradas de la **Imagen 3** “Vista lateral de la maquina tostadora de café” y de la **Imagen 4** “Vista frontal de la maquina tostadora de café”. Esta tabla incluirá una breve descripción de cada componente, su función

dentro del sistema y su ubicación en la máquina tostadora de café, proporcionando así una referencia clara y estructurada de los elementos clave del diseño.

**Tabla 2.**

*Partes mecánicas y electrónicas de la maquina tostadora de café*

Categoría	Nº	Nombre	Especificaciones	Estado
Electrónico	1	Motor Tambor	Motor reductor trifásico 2hp	Implementado
	2	Motor Extractor	Motor de alta RPM trifásico de 1hp	Implementado
	3	Motor Ventilador	Motor trifásico de 1HP	Implementado
	4	Electroválvula de Gas Proporcional	Electroválvula de gas	No Implementado
	5	Motor de compuerta de entrada	Motor paso a paso Nema 23	No Implementado
	6	Motor de compuerta de salida	Motor paso a paso Nema 23	No Implementado
	7	Chispero electrónico	Chispero de 220V AC	No Implementado
	8	Válvula de gas de seguridad	Electroválvula de gas 24V DC	No Implementado
	9	Sensor	Sensor PT 100 (4 hilos)	No Implementado
Mecánico	10	Tolva	Acero Inoxidable 4mm de espesor	
	11	Compuerta de tolva	Acero Inoxidable 4mm de espesor	
	12	Tambor	Acero Inoxidable 4mm de espesor	
	13	Compuerta de tambor	Acero Inoxidable 4mm de espesor	
	14	Quemador	Acero Inoxidable 4mm de espesor	
	15	Compuerta de quemador	Acero Inoxidable	
	16	Cámara enfriamiento	Acero Inoxidable	
	17	Aspas de enfriamiento	Acero Inoxidable	
	18	Visualizador del café	Acero Inoxidable	
	19	Paleta para extraer muestra de café	Acero Inoxidable	
	20	Válvula de gas manual	Acero Inoxidable	
	21	Tapa de tambor	Acero Inoxidable	
	22	Chimenea.	Acero Inoxidable	

*Fuente: Elaboración propia*

### **2.3.3. Procedimiento de recojo de información**

#### **2.3.3.1. Determinación del parámetro a controlar para el proceso de tostado del café**

Para diseñar un sistema automatizado, es crucial identificar las características más importantes del proceso al que se aplicará la automatización. La información clave proviene del conocimiento y la experiencia del maestro tostador, cuya labor es fundamental en el proceso de tueste. Asimismo, el maestro tostador se encarga de manejar cada lote de tueste y ajusta con precisión la máquina para llegar a las temperaturas deseadas.

El proceso de tueste requiere de la habilidad del maestro tostador para interpretar y ajustar los parámetros del tueste en función de las condiciones de cada lote de café. En base a ello se busca automatizar la tostadora para replicar de manera precisa y eficiente, las decisiones que el maestro realiza intuitivamente durante el proceso. La temperatura es el parámetro más importante que determina el desarrollo de los sabores y aromas, otros parámetros como el flujo de aire o la velocidad del tambor han sido ajustados manualmente en función de las características específicas de cada lote de café, pero no se están incluyendo en este sistema de automatización. Por lo que este enfoque responde a la necesidad de garantizar un control preciso y uniforme del perfil térmico durante el proceso del tueste.

A continuación, se detalla las especificaciones necesarias para realizar un tueste de café en un lote (12kg).

**Tabla 3.**

*Parámetros de tueste*

Especificaciones de tueste (12kg)	Descripción	Min	Max
Temperatura	Rango de temperatura de trabajo en el proceso de tueste	20°C	210°C
Tiempo	Tiempo que la maquina debe operar en un proceso de tueste por lote	10min	18min
Cantidad	Capacidad de peso de café verde cargado en la máquina.	15Kg	
Combustible	GLP	10m3/hr *	
Apertura de válvula	Control de válvula para regular el flujo de combustible.	10%	100%

**Fuente:** *Elaboración propia*

El proceso de tueste se clasifica según valores estandarizados que permiten categorizar el café en función de su color. Estos estándares, establecidos por la Specialty Coffee Association of América (SCAA), proporcionan una referencia para comparar el café tostado y facilitar la verificación de la calidad del producto final.

**Imagen 5.**

*Niveles de tueste*



**Fuente:** <https://primerocafe.com.mx/mundo-barista/que-es-escala-agtron-cafe-tostado-cata/>

### 2.3.3.2. Determinación del requerimiento de la maquina según el análisis de las curvas de temperatura

Al identificar y analizar el comportamiento térmico del café en cada proceso se realizaron pruebas de tostado para registrar la temperatura en una gráfica a través del tiempo, con ello poder analizar la curva de temperatura durante el proceso y determinar los puntos críticos que influyen en el desarrollo del perfil de tueste. Asimismo, se realizaron pruebas con tres tipos diferentes de café. Cada selección fue evaluada según variación de temperaturas y velocidades de calentamiento durante el proceso de tueste. Estos datos permitieron identificar las diferencias en las características de cada grano y determinar los ajustes necesarios en los parámetros de la máquina, como la capacidad de regulación precisa de la temperatura, la velocidad de respuesta del sistema de control térmico, las configuraciones óptimas para garantizar un tueste uniforme y reproducible, de acuerdo con los estándares establecidos.

#### Tabla 4.

*Tabla de los tipos de café para registrar parámetros*

CAFÉ			
Nº	Tipo de tueste	Características	SCAA
1	Café (Americano)	Muestra balance entre acidez, dulzor y aroma.	55
2	Café (Frances)	Acidez baja, notas achocolatadas, con mayor textura.	45
3	Café (Italiano)	Notas a chocolate oscuro con mucha textura.	35

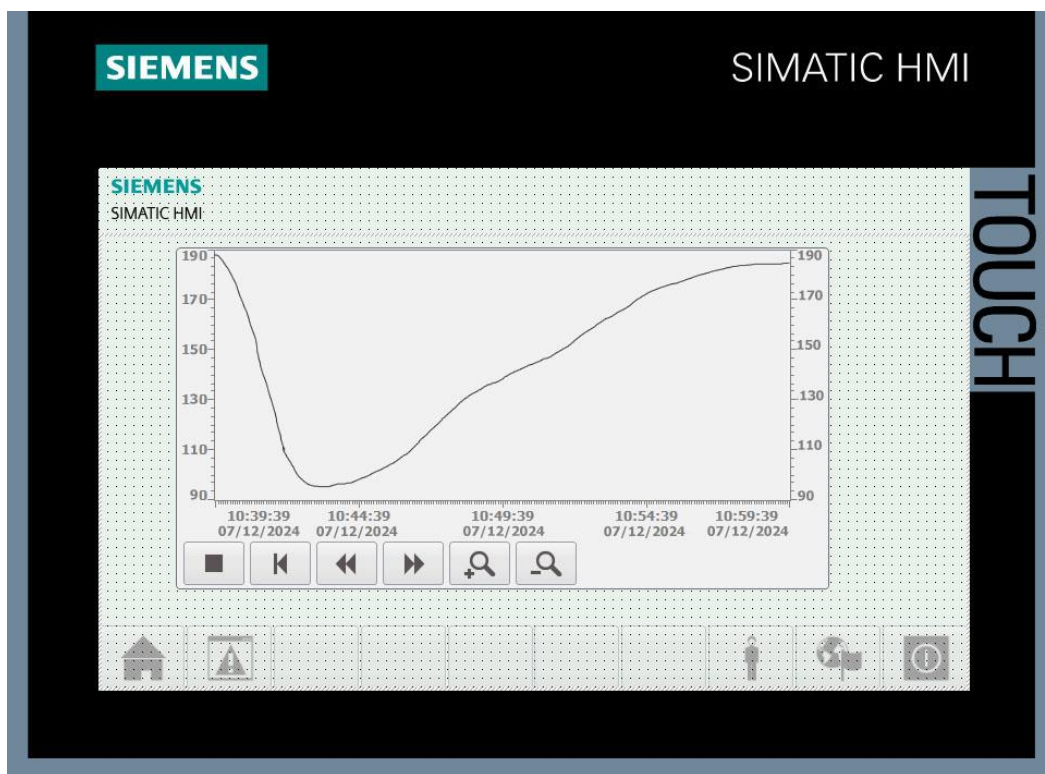
*Fuente: Elaboración propia*

A continuación, se detalla el comportamiento de cada tipo de tueste que se registró en el proceso de tostado.

**Perfil de tueste americano:** El perfil del tostado americano es ligero y preserva los sabores naturales del grano de café, resaltando notas ácidas y frutales. La superficie del grano es seca, con un color marrón claro. Este tipo de tueste alcanza temperaturas entre 200°C y 210°C y suele durar entre 8 y 10 minutos, deteniéndose justo después del primer crack. Es ideal para cafés suaves y de especialidad que buscan destacar los matices propios del origen del grano. A continuación, se muestra el perfil de la curva de temperatura que se registró en la pantalla HMI.

### Imagen 6.

*Perfil de curva de temperatura de café americano*

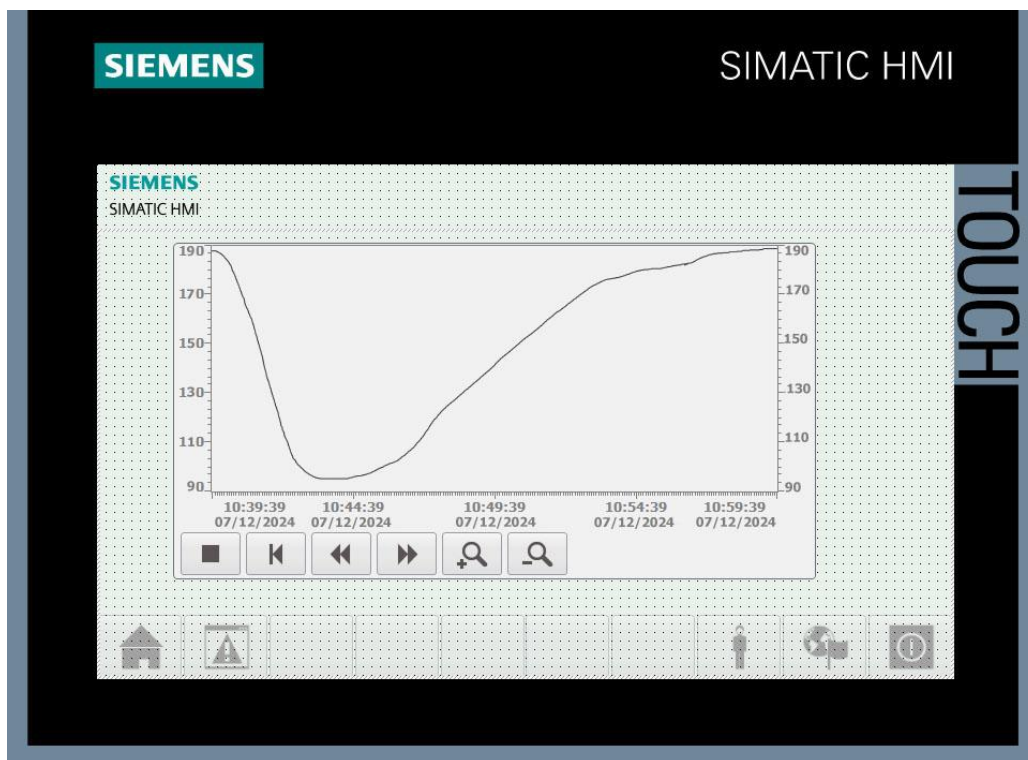


**Perfil de tueste Francés:** El perfil del café francés se caracteriza por ser un poco más oscuro, con un perfil de sabor intenso que combina amargor y un cuerpo pronunciado. Los granos

adquieren una superficie ligeramente aceitosa y un color marrón oscuro casi negro. Este tueste se realiza a temperaturas entre 230°C y 240°C, con una duración de 10 a 12 minutos, deteniéndose antes de que los granos se quemen. Es típico en cafés fuertes como los expresos y capuchinos. A continuación, se muestra el perfil de la curva de temperatura que se registró en la pantalla HMI.

### Imagen 7.

*Perfil de curva de temperatura de café francés*

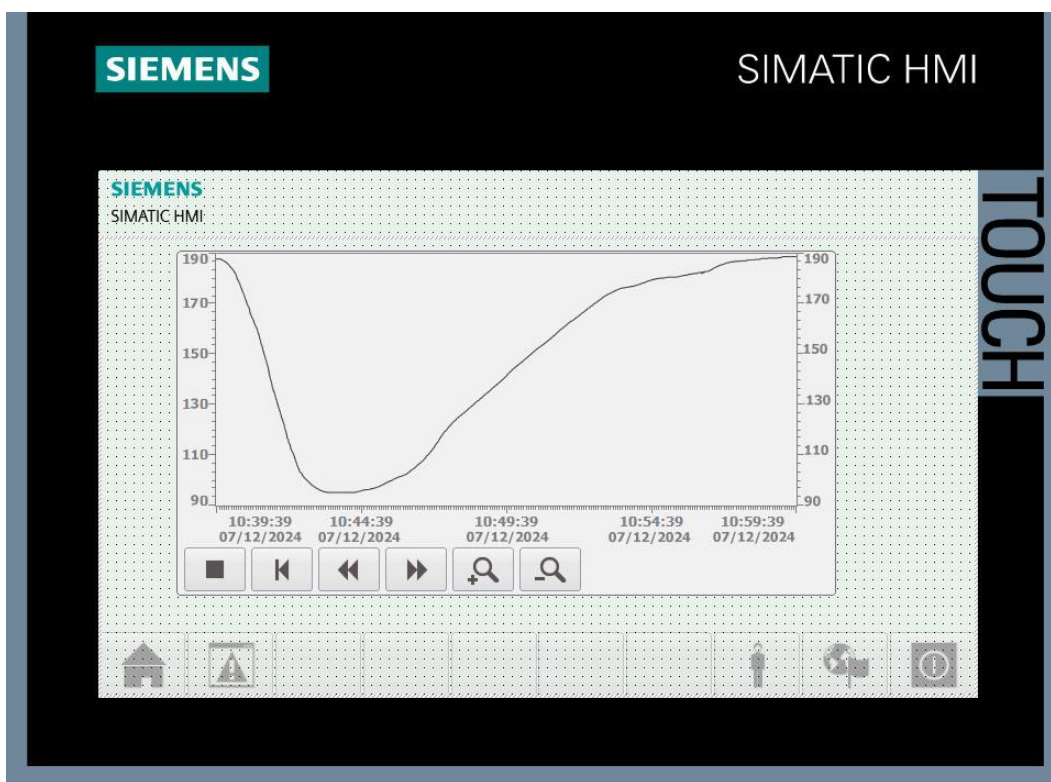


**Perfil de tueste italiano:** El tueste italiano es uno de los más oscuros, ofreciendo un sabor robusto con notas ahumadas y amargas. Los granos tienen una superficie brillante por los aceites liberados y presentan un color muy oscuro. Este tueste se lleva a temperaturas de 240°C a 250°C y tiene una duración de 12 a 14 minutos, cruzando el segundo crack y acercándose al punto de carbonización. Es común en cafés potentes, ideales para quienes prefieren sabores

intensos. A continuación, se muestra el perfil de la curva de temperatura que se registró en la pantalla HMI.

**Imagen 8.**

*Perfil de curva de temperatura de café italiano*



Después de analizar las características y parámetros específicos de los tres tipos de café seleccionados, se establecieron los valores de referencia para el control del proceso de tostado. A continuación, se presenta una tabla que detalla los parámetros definidos por el maestro tostador según el tipo de café:

**Tabla 5.**

*Tabla de parámetros para controlar según maestro y Café*

PARÁMETROS PARA CONTROLAR SEGÚN MAESTRO TOSTADOR SEGÚN EL TIPO DE CAFÉ							
CAFÉ				PARÁMETRO			
Nº	Tipo de tueste	Características	SCAA	Temperatura Inicial	Temperatura Final	Apertura de Válvula	Tiempo de tostado
1	Café (Americano)	Muestra balance entre acidez, dulzor y aroma.	55	110° C - 120° C	200 °C	10%-30%	9min - 12 min
2	Café (Frances)	Acidez baja, notas achocolatadas, con mayor textura.	45	110° C - 120° C	210°C	10%-30%	12min - 14min
3	Café (Italiano)	Notas a chocolate oscuro con mucha textura.	35	110° C - 120° C	210°C	10%-30%	13min - 14min

*Fuente: Elaboración propia*

**Detalles adicionales:**

- **Temperatura inicial:** Es la temperatura a la que el tambor debe precalentarse cuando está a punto de ingresar los granos de café.
- **Temperatura final:** Es la temperatura máxima de calor que alcanza el grano al finalizar el proceso de tueste.
- **Apertura de válvula:** La apertura de la válvula se expresa en términos porcentuales para facilitar su control y comprensión. Un 10% representa la apertura mínima requerida para iniciar el proceso de tostado. Por otro lado, un 100% corresponde a la apertura total de la válvula, equivalente a media vuelta completa, asegurando el máximo flujo permitido para el sistema.

## 2.3.4. Tratamiento y análisis de datos

### 2.3.4.1. Selección de componentes, dispositivos y principio de instrumentación

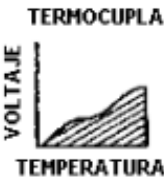


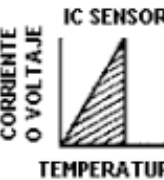
Los sensores seleccionados tienen como propósito principal monitorear el estado y gestionar las acciones involucradas en el proceso de tueste de café, conforme a los lineamientos establecidos en la guía de procedimiento definida por el maestro tostador.

#### a) Sensores de temperatura

Para medir la temperatura, principal parámetro de entrada, hay disponibles diferentes tecnologías como los termistores, termocuplas, RTD y circuitos integrados, cada uno con sus ventajas y desventajas según sea la aplicación.

#### Imagen 9.

*Comparativo de sensores de temperatura*

	 TERMOCUPLA VOLTAJE TEMPERATURA	 RESISTENCIA RTD TEMPERATURA	 RESISTENCIA TERMISTOR TEMPERATURA	 CORRIENTE O VOLTAJE IC SENSOR TEMPERATURA
LINEALIDAD		X		XX
SENSIBILIDAD			X	XX
ROBUSTEZ	X			
COSTO	XX		X	X
ESTABILIDAD		X		
PRECISION		XX		X
TIEMPO RESPUESTA	X			
INMUN. RUIDO				X
DISP. POTENCIA	XX			X
MAX. RANGO TEMP(°C)	- 270 A +2980	-180 A +630	-80 A +150	-55 A +150

X- BUENO  
XX- EXCELENTE

*Fuente: Rojas, D. (2021)*

Para seleccionar el tipo de sensor adecuado, nos basamos en los rangos de temperatura de trabajo durante el proceso de tueste. Según esta tabla, en el proceso de tueste se opera entre 25°C y 250°C, por lo que se optará por el sensor RTD, específicamente el PT100, debido a su amplio rango de medición. Esto descarta el uso de termocuplas y termistores para este propósito.

### b) Controlador de flama

Un controlador de flama es un dispositivo electrónico que monitorea la presencia de llama. Su función principal es detectar la llama mediante un sensor específico y, en caso de fallo o ausencia de llama, apagar el suministro de combustible para prevenir accidentes de alto riesgo. En la selección del controlador de flama para la tostadora de café, se han evaluado tres modelos básicos de marcas reconocidas en el mercado: Honeywell, Siemens y AMCE. Cada uno de estos controladores ofrece diferentes características que se ajustan a diversas necesidades industriales.

**Tabla 6.**

*Tabla de controlador de flama para la tostadora de café de tres modelos básicos*

Características	Honeywell 7800 Series	Siemens LME21	AMCE VG10
Facilidad de Uso	Interfaz digital con pantalla LED, configuración por teclas	Pantalla LED, configuración mediante interruptores DIP	Botón manual y ajuste mecánico sencillo
Costo	\$400 - \$600 USD	\$300 - \$500 USD	\$200 - \$300 USD
Funcionalidad	Monitoreo continuo de flama, diagnóstico de fallas	Control de quemadores simples, auto-test de encendido	Detección básica de flama
Disponibilidad	Alta, fácilmente disponible en distribuidores	Alta, distribuidores oficiales y online	Media, disponible en tiendas especializadas
Compatibilidad	Múltiples tipos de quemadores (gas, petróleo)	Quemadores de gas	Quemadores simples (gas)
Tipo de Sensor	UV, IR, y electrodos de ionización	Electrodos de ionización y sensores de llama UV	Electrodos de ionización

Alimentación de Voltaje	120/240 V AC	230 V AC	110/220 V AC
Soporte Técnico	Extenso, asistencia 24/7 y documentación amplia	Amplio, soporte en línea y documentación	Limitado, soporte por correo electrónico
Módulos Adicionales	Requiere módulos adicionales para sensores y amplificación	No requiere módulos adicionales	No requiere módulos adicionales
Entradas	Sensores UV, IR, electrodos de ionización, entradas digitales	Electrodos de ionización, sensores UV, entradas digitales	Electrodos de ionización, entradas digitales
Salidas	Salidas para válvulas de gas, ventilador, encendido, alarma	Salidas para válvulas de gas, ventilador, encendido	Salidas para válvulas de gas, encendido

*Fuente: Elaboración propia*

Dado que las necesidades para la tostadora de café son básicas, se requiere un controlador que sea sencillo, eficiente y comercialmente accesible. La prioridad es un dispositivo que garantice la seguridad básica sin requerir funciones avanzadas o configuraciones complejas. Por estas razones, se ha seleccionado el AMCE VG10. A continuación, se muestra imagen del quemador marca AMCE modelo VG 10.

### Imagen 10.

*Quemador modelo VG 10*



*Fuente: <https://amcecontrolesdeflama.com.mx/>*

Este controlador se adapta perfectamente a las necesidades del proyecto, ofreciendo un equilibrio ideal entre simplicidad y funcionalidad, a un costo competitivo. Su facilidad de uso, compatibilidad con aplicaciones simples de gas, y alimentación versátil lo convierten en la opción más adecuada para asegurar el control eficiente del proceso de tostado sin incurrir en costos innecesarios o en configuraciones complicadas.

### c) Sensor de flama

Los sensores de flama son dispositivos diseñados para detectar la presencia de una llama o fuego en sistemas de combustión, como calderas, hornos o quemadores. Estos sensores aseguran la seguridad y eficiencia del proceso, apagando el sistema en caso de que la llama se extinga accidentalmente. Los principales tipos de sensores de flama son:

**Tabla 7.**

*Tabla de comparación de los principales tipos de sensores de flama*

Tipo de Sensor	Descripción	Aplicaciones Comunes	Ventajas	Desventajas	Requiere Amplificador de Flama
Ultravioleta (UV)	Detecta radiación ultravioleta emitida por la llama	Quemadores de gas y petróleo	Alta sensibilidad, rápida respuesta, no afecta luz visible	No funciona con llamas invisibles o frías	Si
Infrarrojo (IR)	Detecta radiación infrarroja de la combustión	Quemadores de carbón y petróleo	Buen rendimiento en entornos con humo o polvo	Respuesta más lenta, puede verse afectado por radiación IR ambiental	Si
Fotocélula (Luz Visible)	Detecta luz visible de la llama	Quemadores de gas y petróleo	Económico, fácil instalación	Afectado por luz ambiental, limitada a ciertos combustibles	No

Ionización	Detecta la conductividad eléctrica en la llama	Quemadores de gas	Alta confiabilidad, buena para aplicaciones de gas	No aplicable para combustibles líquidos o sólidos	Si
Combinado (UV e IR)	Combina tecnologías UV e IR	Sistemas críticos	Mayor fiabilidad, precisión mejorada	Más costoso, requiere más mantenimiento	Si

*Fuente: Elaboración propia*

El sensor de ionización fue seleccionado debido a su alta confiabilidad y eficiencia para aplicaciones que utilizan quemadores de gas, como en el caso de la tostadora de café. Este tipo de sensor detecta la conductividad eléctrica generada por la llama, asegurando una respuesta rápida y precisa en el monitoreo de la combustión. A diferencia de otros sensores como los de ultravioleta (UV) o infrarrojo (IR), el sensor de ionización no se ve afectado por la luz ambiental ni requiere un entorno específico para operar, lo que lo hace ideal para aplicaciones industriales básicas. Además, aunque requiere un amplificador de flama, su simplicidad y efectividad en la detección de llamas de gas garantizan la seguridad del sistema de manera eficiente, manteniendo los costos bajos y asegurando un mantenimiento sencillo.

#### **d) Sensor de proximidad**

En el mercado existen diversos tipos de sensores de proximidad diseñados para aplicaciones en entornos de altas temperaturas, como el que se presenta en la máquina tostadora de café. Entre los más comunes se encuentran los sensores inductivos, capacitivos, fotoeléctricos, magnéticos y de ultrasonido. Cada uno de estos sensores tiene características específicas que los hacen adecuados para diferentes condiciones de trabajo y materiales a detectar. A continuación, se describen en detalle las principales opciones disponibles, junto con sus ventajas, desventajas y rangos de temperatura de operación.

**Tabla 8.**

*Tabla de ventajas y desventajas según su tipo de sensor*

Tipo de Sensor	Rango de Temperatura	Descripción	Ventajas	Desventajas	Precio Aproximado
Inductivo	Hasta 250°C	Detecta objetos metálicos mediante inducción electromagnética.	- Alta durabilidad. - Resistente a condiciones extremas. - Sin contacto mecánico.	- Solo detecta objetos metálicos	50-120
Capacitivo	Hasta 250°C	Detecta objetos metálicos y no metálicos (plásticos, líquidos) mediante cambios en capacitancia.	- Versatilidad para detectar materiales diversos. - Resistente a altas temperaturas.	- Sensible a la humedad y al polvo	500-1000
Magnético	Hasta 250°C	Detecta campos magnéticos generados por objetos ferromagnéticos.	- Alta resistencia a entornos adversos - Larga vida útil.	- Solo detecta materiales magnéticos	100-200

*Fuente: Elaboración propia*

Tras evaluar las diferentes opciones de sensores de proximidad, hemos decidido optar por el sensor inductivo de alta temperatura. Este sensor destaca por su durabilidad y resistencia en condiciones extremas, lo que lo hace ideal para el entorno de la máquina tostadora de café, donde las temperaturas pueden alcanzar hasta 250°C. Además, su capacidad para detectar objetos metálicos sin contacto mecánico reduce el desgaste y el mantenimiento necesario. Otro factor determinante en la elección fue su costo, ya que ofrece una excelente relación calidad-precio en comparación con otros sensores de características similares. Por estas razones, el

sensor inductivo se presenta como la opción más adecuada para nuestro proyecto.

### e) Selección de actuadores

**Tabla 9.**

*Tabla según su tipo de actuador*

Cantidad	Tipo de actuador	Características	Ubicación	Función
1	Motor paso a paso	Funcionamiento digital, acoplado a una válvula de gas de precisión.	Cerca de la tapa de la compuerta del quemador.	Controlar la válvula de combustible.
1	Motor reductor trifásico	Motor diseñado para funcionar las 24 hrs del día, 2 hp, 15 RPM.	Eje del tambor.	Girar el tambor.
1	Motor de alta RPM	Motor diseñado para funcionar las 24 hrs del día, 180 RPM.	Chimenea.	Extraer las cascarillas que expulsan el café y el humo acumulado dentro del tambor.
1	Motor monofásico	Motor de baja potencia para enfriar el café tostado por 5 minutos.	Debajo de la cámara de enfriamiento.	Enfriar el café recién salido del tambor.
1	Encendedor de chispa	Piezo eléctrico capaz de soportar hasta 400°C	Al costado del quemador.	Encender el fuego del quemador.

*Fuente: Elaboración propia*

### f) Selección de PLC

La selección del controlador lógico programable (PLC) para la máquina de tueste de café se basa en los requisitos específicos del proceso, considerando factores como la cantidad de entradas y salidas, la capacidad de procesamiento, y la flexibilidad para posibles expansiones. Un PLC debe ser capaz de gestionar con precisión las señales de los sensores, ejecutar los algoritmos de control (PID) y coordinar los actuadores necesarios para garantizar un tueste

eficiente y consistente.

Entre las características clave a considerar en el PLC seleccionado se incluyen:

- Capacidad de expansión: Módulos adicionales para entradas y salidas digitales/analógicas, permitiendo adaptarse a nuevas configuraciones.
- Capacidad de comunicación: Protocolos como Profinet, Modbus o Ethernet, que facilitan la integración con otros dispositivos y sistemas de monitoreo.
- Procesamiento rápido: Para responder en tiempo real a los cambios en las variables del proceso, garantizando un control preciso.
- Soporte para control avanzado: Funciones integradas para implementar controladores PID, timers y lógicas secuenciales.
- Alimentación y robustez: Operación confiable en entornos industriales, con tolerancia a variaciones eléctricas y temperaturas entre 20°C y 60°C.

**Tabla 10.**

*Tabla de entradas y salidas*

#	Entradas	Salidas
1	Start	Led Start
2	Stop	Led Stop
3	Parada de emergencia	Válvula de gas de seguridad
4	Detector de flama	Chispero electrónico
5	Motor Tambor	Motor Tambor
6	Motor Extractor	Motor Extractor
7	Motor Ventilador	Motor Ventilador
8	Sensor de compuerta de tolva	Motor de compuerta de tolva
9	Sensor de compuerta de tambor	Motor de compuerta de tambor
10	Automático	Motor Paso a Paso de válvula de gas
11	Manual	
12	Sensor PT100	

**Fuente:** *Elaboración propia*

Con el fin de obtener una decisión acertada, en cuanto a la proposición del PLC, es relevante definir las entradas y salidas que tendrá el dispositivo (Tabla 10), en función del proceso de tueste.

**Tabla 11.**

*Tabla de cantidad de entradas y salidas*

Entradas	Salidas
1 analógica	10 digitales
11 digitales	

***Fuente:*** *Elaboración propia*

Para el proyecto en desarrollo, se requiere un PLC que cumpla con las siguientes características: 1 entrada analógica, 10 entradas digitales, y 10 salidas digitales, además de ofrecer flexibilidad para futuras expansiones y facilidad de integración en el sistema. Con estos requerimientos en mente, se evaluarán tres opciones de controladores de las marcas Siemens, ABB y Delta, conocidas por su fiabilidad y presencia en el mercado industrial. A continuación, se presenta un cuadro comparativo que detalla las especificaciones técnicas y costos, con el objetivo de seleccionar la opción más adecuada para las necesidades del proyecto.

**Tabla 12.**

*Tabla comparativa de especificaciones técnicas y costos*

<b>Características</b>	<b>Siemens S7-1200</b>	<b>ABB AC500</b>	<b>Delta DVP-12SE</b>
Precio Aproximado	\$350 - \$500 USD	\$300 - \$450 USD	\$150 - \$250 USD
Entradas Digitales	10 entradas digitales	10 entradas digitales	10 entradas digitales
Salidas Digitales	10 salidas digitales	10 salidas digitales	10 salidas digitales
Entrada Analógica	1 entrada analógica	1 entrada analógica	1 entrada analógica
Facilidad de Uso	Interfaz intuitiva, compatible con TIA Portal.	Requiere software CODESYS para programación.	Fácil programación con software de Delta.
Alimentación de Voltaje	24 V DC	24 V DC	24 V DC
Comercialidad	Alta disponibilidad y soporte en distribuidores oficiales y en línea.	Disponible en distribuidores industriales, con buena red de soporte técnico.	Disponible en distribuidores locales, con un costo competitivo y soporte básico.
Módulos Expansibles	Compatible con módulos de expansión para entradas y salidas adicionales.	Amplia gama de módulos de expansión disponibles.	Limitado a los módulos estándar de la serie.
Soporte Técnico	Extensa documentación y soporte en línea a nivel global.	Soporte técnico robusto, con red de distribución global.	Soporte técnico básico, principalmente en línea.
Ventajas	Flexibilidad, escalabilidad, integración con otros sistemas Siemens.	Alta confiabilidad, gran cantidad de opciones de módulos.	Bajo costo, fácil implementación para proyectos pequeños.
Desventajas	Precio relativamente alto, requiere más tiempo de configuración.	Requiere conocimientos más avanzados de CODESYS.	Funcionalidad limitada, no tan flexible en proyectos grandes.

*Fuente: Elaboración propia*

Después de evaluar las opciones disponibles, se ha decidido seleccionar el **PLC Siemens S7-1200** para este proyecto. Este controlador destaca por su flexibilidad, escalabilidad y la posibilidad de integración con otros sistemas Siemens, lo que facilita futuras expansiones del sistema. Además, su compatibilidad con el software TIA Portal asegura una programación intuitiva y eficiente. Aunque su costo es ligeramente superior a otras opciones, la alta disponibilidad en el mercado y el soporte técnico robusto a nivel global justifican la inversión. Estas características hacen del Siemens S7-1200 la elección ideal para garantizar un control confiable y eficiente en el sistema de automatización de la tostadora de café.

#### **2.3.4.2. Sistema de Control**

El sistema de control en una tostadora de café automatizada es fundamental para garantizar la estabilidad y repetibilidad del proceso de tostado. En este contexto, los controladores P, PI y PID desempeñan un papel crucial en la regulación de la temperatura del sistema, asegurando que el perfil térmico del tostado sea preciso y consistente. La implementación de estos controladores mediante un PLC (Controlador Lógico Programable) permite una gestión eficiente del proceso, optimizando la calidad del producto final.

El tostado del café es un proceso que requiere una regulación precisa de la temperatura y el tiempo para obtener perfiles de sabor y aroma específicos. Cada tipo de tueste demanda un control minucioso, considerando factores como la temperatura inicial, la temperatura final y la apertura de la válvula de combustible. La estabilidad térmica durante este proceso es esencial, ya que cualquier variación puede afectar negativamente la calidad del producto final.

### **Control PID en el Tostado de Café**

El control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es el más utilizado en procesos térmicos como el tostado de café debido a su capacidad para corregir desviaciones y mantener la temperatura estable. Este controlador opera con tres componentes fundamentales:

1. Componente Proporcional (P): Ajusta la salida en función del error actual. Si la temperatura medida se desvía de la temperatura deseada, el controlador aplica una corrección proporcional a la magnitud del error.
2. Componente Integral (I): Acumula el error a lo largo del tiempo y realiza ajustes progresivos para eliminar el error en estado estacionario. Esto es útil en el tostado de café, donde se requiere que la temperatura se mantenga constante durante el tiempo de tostado.
3. Componente Derivativo (D): Evalúa la velocidad de cambio del error y aplica correcciones anticipadas. En el tostado de café, este componente ayuda a evitar fluctuaciones bruscas de temperatura al reaccionar rápidamente a variaciones en la carga térmica del sistema.

La ecuación general del control PID está definida por:

Donde:

- $u(t)$  es la señal de control aplicada al sistema.
- $e(t)$  es el error entre la temperatura deseada y la temperatura real.
- $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , y son los coeficientes de ganancia de cada componente.

### a) Aplicación del Control PID en una Tostadora de Café

En un sistema de tostado automatizado, el control PID es implementado mediante un PLC programado para monitorear y regular la temperatura en tiempo real. La temperatura inicial del proceso suele oscilar entre 110°C y 120°C, dependiendo del tipo de café. Durante el proceso, el sistema ajusta automáticamente la apertura de la válvula de gas y el tiempo de exposición al calor para lograr temperaturas finales que pueden llegar hasta los 210°C.

Cada tipo de café presenta variaciones en la temperatura y tiempos de tostado, lo que afecta la configuración de los coeficientes PID. La siguiente tabla muestra una comparación de los valores recomendados para distintos tipos de tueste:

**Tabla 13.**

*Relación de las constantes PID y sus parámetros*

Tipo de Café	Kp	Ki	Kd	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Tiempo de Tostado (min)
Americano	2	0.5	0.1	110 - 120	200	9-Dic
Francés	2.5	0.6	0.15	110 - 120	210	Dic-14
Italiano	3	0.7	0.2	110 - 120	210	13 - 14

*Fuente: Elaboración propia*

### b) Influencia de la Temperatura en el Comportamiento del Control PID

El comportamiento del sistema PID varía en función de la temperatura del proceso. A continuación, se presenta un cuadro con las tendencias observadas en la respuesta del control PID en función del rango de temperatura utilizado en el tostado de café:

**Tabla 14.**

*Respuesta de Control según la temperatura*

Rango de Temperatura (°C)	Respuesta del PID	Ajustes Recomendados
100 - 150	Respuesta lenta, riesgo de subcalentamiento	Aumentar Kp y Ki, reducir Kd
150 - 180	Respuesta estable, control óptimo	Mantener valores estándar
180 - 210	Respuesta rápida, riesgo de sobrecalentamiento	Reducir Kp, aumentar Kd

*Fuente: Elaboración propia*

### **Beneficios del Control PID en el Tostado de Café**

El uso de un sistema PID en el tostado de café ofrece múltiples ventajas, entre ellas:

- **Mayor precisión:** Mantiene la temperatura dentro de un rango óptimo, asegurando que los granos alcancen el nivel de tostado deseado.
- **Consistencia del producto:** Evita variaciones en los lotes de producción, lo que garantiza una calidad uniforme en cada ciclo de tostado.
- **Reducción de desperdicios:** Minimiza errores por sobrecalentamiento o enfriamiento inadecuado.
- **Automatización eficiente:** Reduce la intervención humana y mejora la reproducibilidad del proceso.

#### **2.3.4.3. Sistema de Automatización**

##### **a) Diagrama de Flujo**

El diagrama de flujo representa la secuencia lógica del proceso de tostado en la máquina automatizada. En este esquema se detallan cada una de las etapas del sistema, desde el inicio,

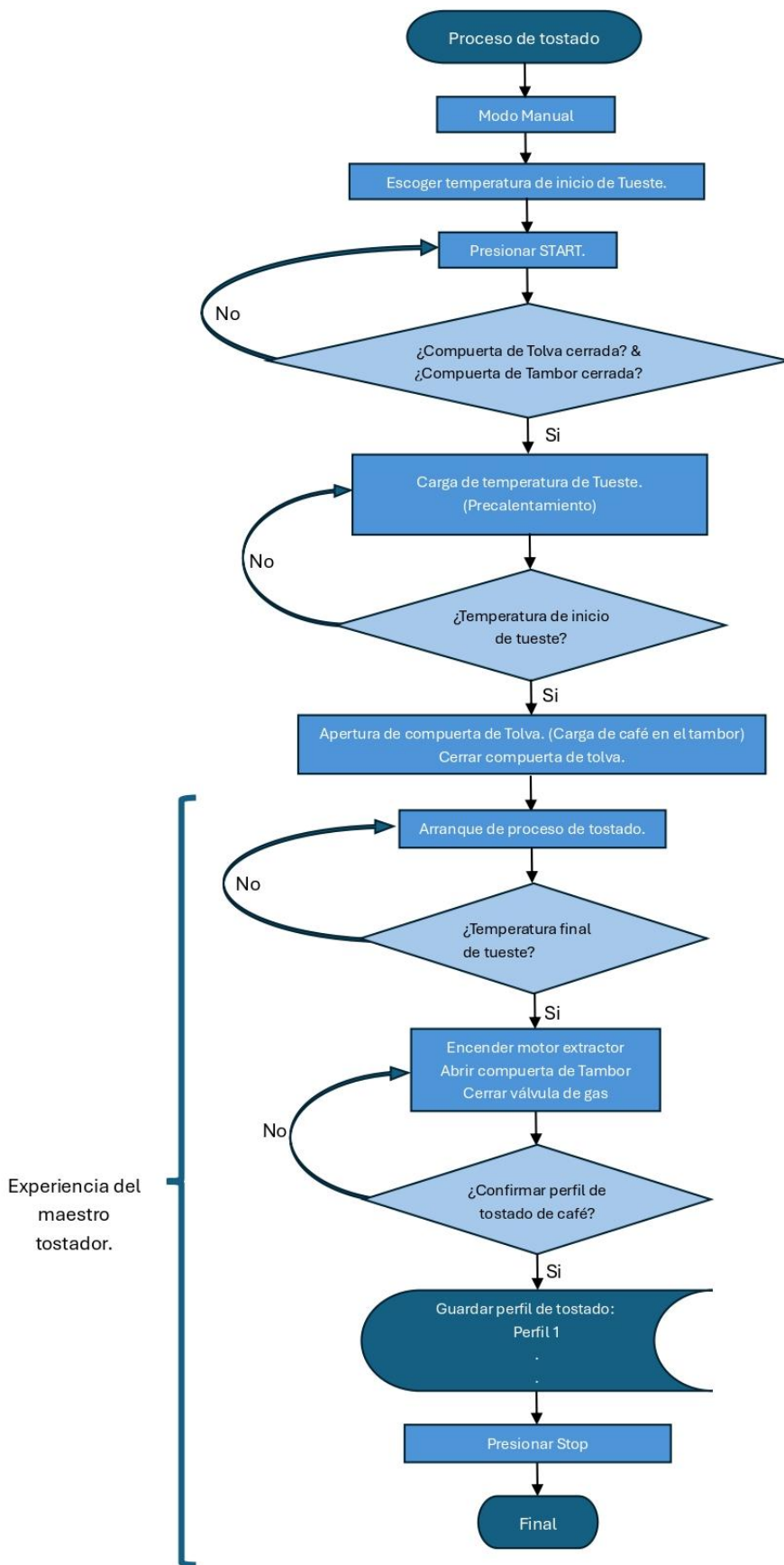
el precalentamiento, la regulación de temperatura mediante el control PID, la monitorización de variables y la finalización del tostado. Este diagrama facilita la comprensión del funcionamiento del sistema y permite visualizar posibles mejoras en la automatización del proceso.

### **Proceso Manual**

El proceso manual de tostado requiere la intervención constante del operador, quien ajusta manualmente la temperatura, el flujo de gas y el tiempo de tostado basándose en su experiencia y observación visual del color y aroma del café.

1. **Inicio del proceso:** Se presiona el botón START y se verifica que la compuerta de tolva y tambor estén cerradas.
2. **Ajuste de temperatura:** El operador elige la temperatura inicial de tueste y supervisa el precalentamiento del tambor.
3. **Carga del café:** Una vez alcanzada la temperatura de inicio, se abre la compuerta de la tolva para introducir los granos.
4. **Supervisión continua:** Durante el proceso, el operador debe evaluar visual y olfativamente el tostado, ajustando el gas y el tiempo.
5. **Descarga del café:** Al alcanzar la temperatura final, se enciende el extractor, se abre la compuerta del tambor y se cierra la válvula de gas.
6. **Finalización:** Se almacena el perfil de tostado si es necesario y se detiene el proceso.

“DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL  
 PROCESO DE TOSTADO DE CAFÉ MEDIANTE UN CONTROL  
 PID PARA REPLICAR DE FORMA PRECISA UN PERFIL DE  
 TEMPERATURA OBTENIDO DE UN PROCESO MANUAL EN UNA  
 EMPRESA DEL SECTOR AGROINDUSTRIAL EN LIMA”



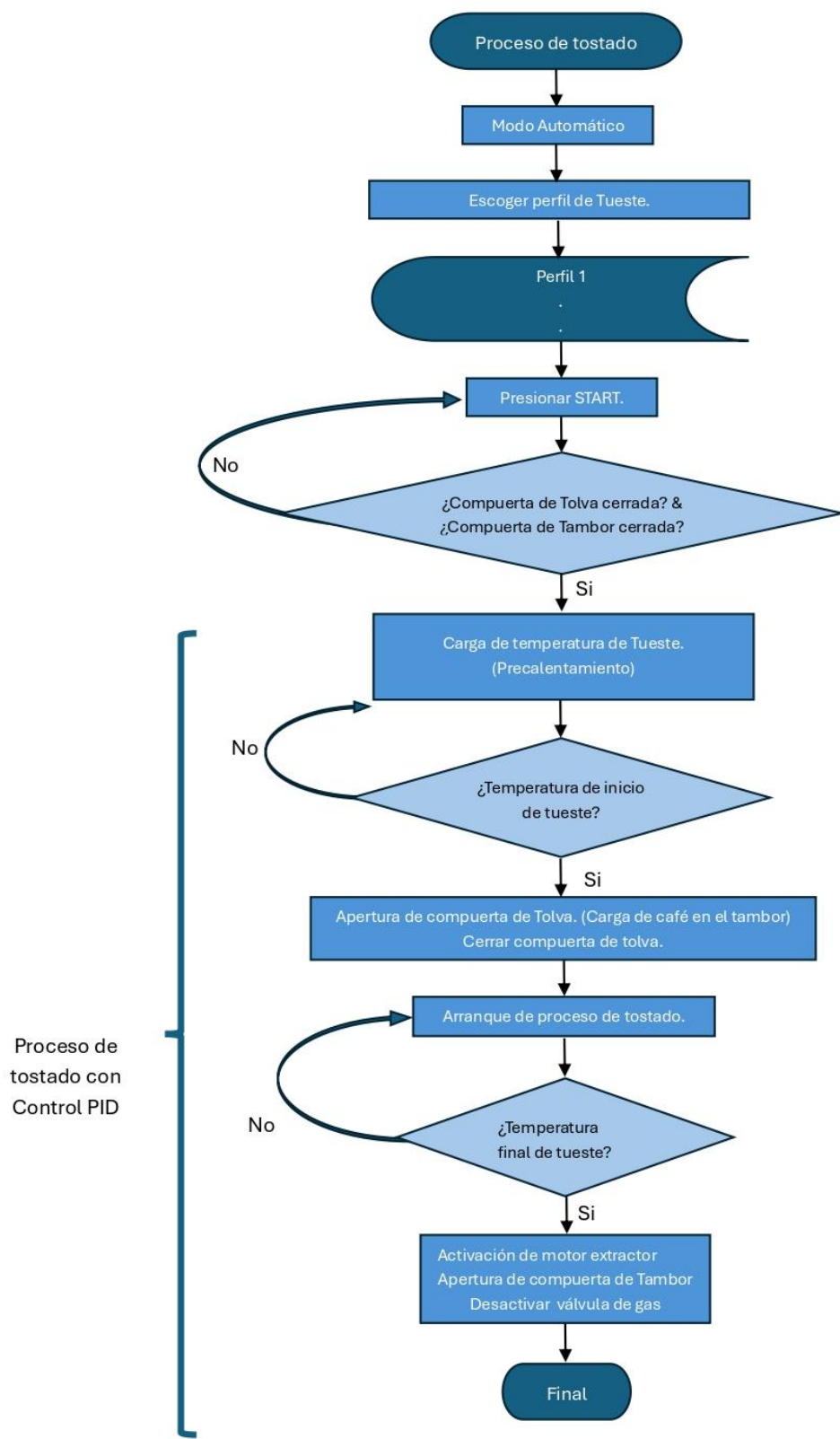
Este proceso requiere de la intervención constante del operador, quien ajusta manualmente la temperatura y monitorea el estado del café durante el tostado. La experiencia del maestro tostador juega un papel fundamental en la obtención de un café de calidad óptima.

### **Proceso Automático**

El proceso automático optimiza el tostado al ejecutar un perfil preconfigurado, minimizando la intervención del operador y mejorando la consistencia del resultado.

1. **Inicio automático:** El operador presiona START y el sistema verifica automáticamente el estado de las compuertas.
2. **Selección del perfil:** Se elige un perfil de tostado predeterminado en la HMI, donde se establecen temperatura y tiempos.
3. **Pre calentamiento y carga:** El sistema calienta el tambor y, al alcanzar la temperatura deseada, abre la compuerta de la tolva para cargar el café.
4. **Control de temperatura:** Mediante el PID, el sistema regula automáticamente la temperatura y el flujo de aire.
5. **Finalización del tostado:** Al alcanzar la temperatura final, el sistema activa el extractor, abre la compuerta del tambor y cierra la válvula de gas.
6. **Registro de datos:** Se guarda automáticamente el perfil de tostado en la memoria del sistema para futuras referencias.

“DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL  
 PROCESO DE TOSTADO DE CAFÉ MEDIANTE UN CONTROL  
 PID PARA REPLICAR DE FORMA PRECISA UN PERFIL DE  
 TEMPERATURA OBTENIDO DE UN PROCESO MANUAL EN UNA  
 EMPRESA DEL SECTOR AGROINDUSTRIAL EN LIMA”



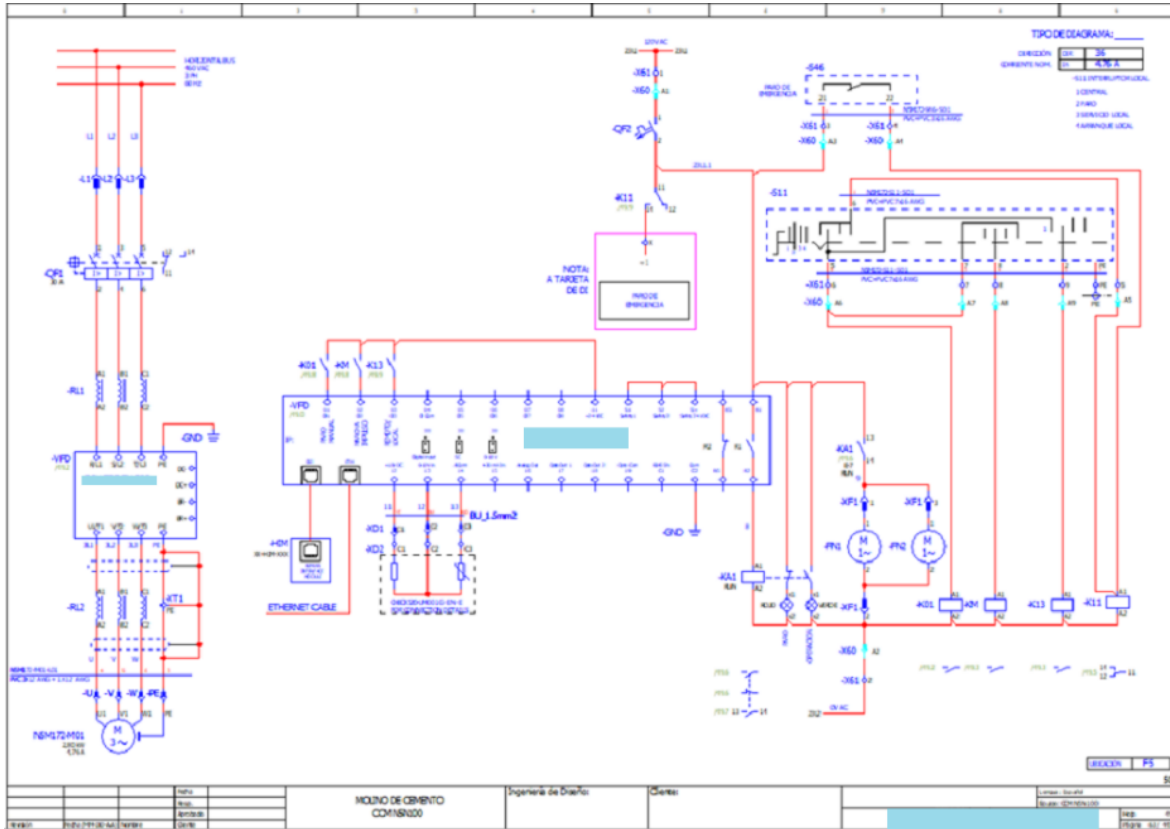
El sistema permite la selección de distintos perfiles de tueste previamente configurados, garantizando un control preciso y estandarizado de la calidad del café tostado. La automatización minimiza la variabilidad y reduce la dependencia de la experiencia del operador.

#### **b) Planos de Control**

Los planos de control muestran la distribución y conexión de los dispositivos encargados de la regulación del sistema, como sensores de temperatura, controladores PID, contactores y actuadores. Estos planos son fundamentales para asegurar que el sistema funcione de manera óptima y permita una correcta supervisión. A través de estos esquemas, se pueden identificar las señales eléctricas y las interacciones entre los componentes para garantizar una operación eficiente y segura.

**Imagen 11.**

*Plano de Control*

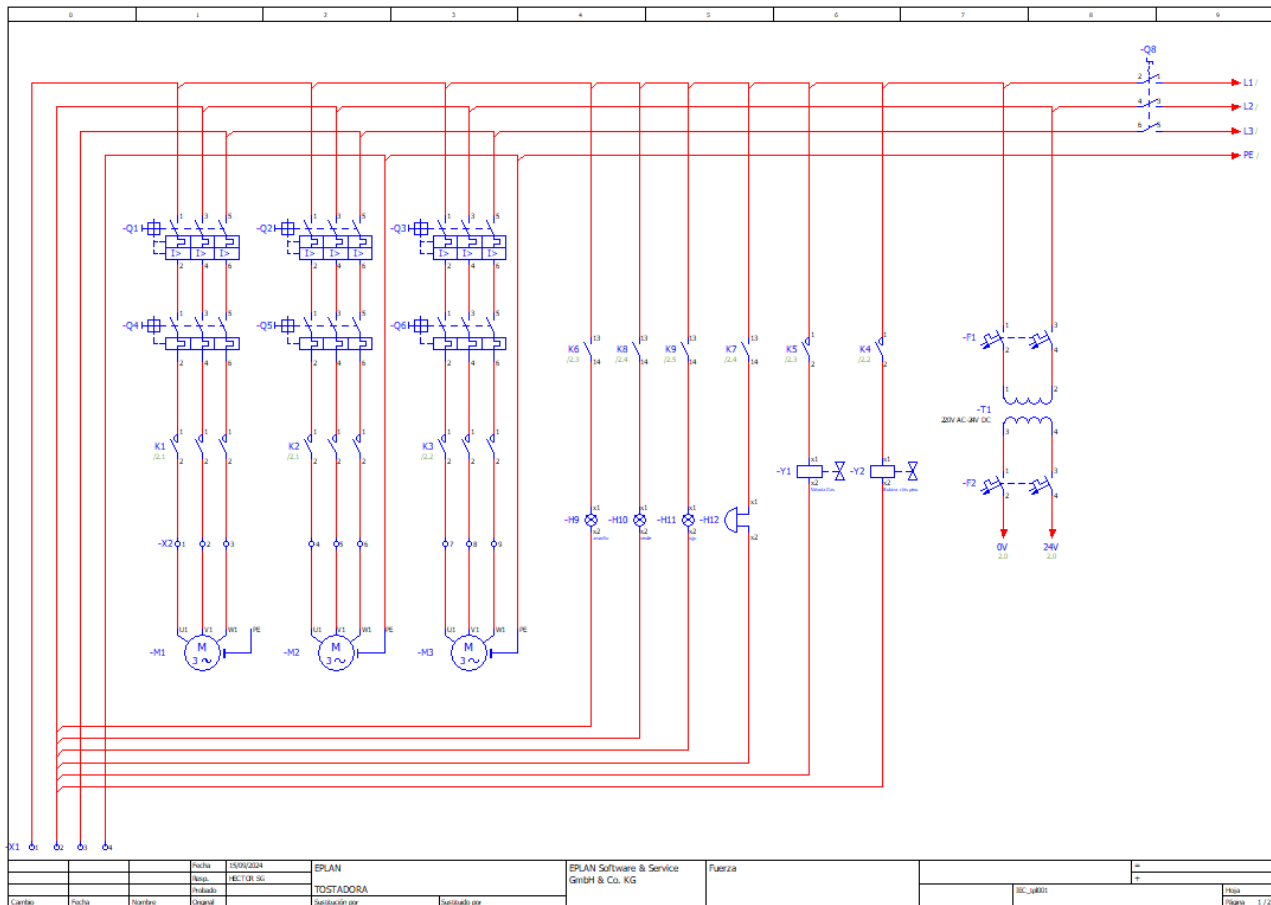


**c) Planos de Fuerza**

Los planos de fuerza presentan el diseño del sistema eléctrico que alimenta los componentes de potencia, incluyendo resistencias de calentamiento, motores y dispositivos de protección. En estos planos se especifican los calibres de los cables, la distribución de cargas y los sistemas de seguridad que protegen la instalación. Un adecuado diseño de los planos de fuerza es clave para evitar sobrecargas, cortocircuitos y otros problemas eléctricos que puedan afectar el funcionamiento del equipo.

## Imagen 12.

### Plano de Fuerza



### d) Dimensionamiento del Tablero Eléctrico

El dimensionamiento del tablero eléctrico se llevó a cabo teniendo en cuenta la potencia total demandada por la máquina, la distribución óptima de los componentes dentro del gabinete y una ventilación adecuada para prevenir el sobrecalentamiento. A continuación, se presentan los cálculos realizados para seleccionar correctamente los dispositivos de protección, como breakers y contactores, garantizando una operación segura y eficiente del sistema. Además, el diseño contempla espacio disponible para futuras ampliaciones o modificaciones del sistema de automatización.

### Cálculo de la Corriente y Dimensionamiento de Breakers

a) **Motor reductor trifásico 2 HP (tambor):**

$$I = \frac{HP \times 746}{3 \times V \times Eficiencia}$$

$$I = \frac{2 \times 746}{3 \times 220 \times 0.85} = 5.7 A$$

Se recomienda un breaker de **10A**.

b) **Motor de alta RPM trifásico de 1 HP (Extractor):**

$$I = \frac{1 \times 746}{3 \times 220 \times 0.85} = 2.9 A$$

Se recomienda un breaker de **6A**.

c) **Motor trifásico de 1HP (Ventilador):**

$$I = \frac{1 \times 746}{3 \times 220 \times 0.85} = 2.9 A$$

Consumo de **1A**. Breaker recomendado: **2A monofásico**.

**Tabla 15.**

*Dispositivos de Protección y cableado*

Componente	Corriente (A)	Breaker recomendado	Sección del cable (mm <sup>2</sup> )
Motor reductor trifásico 2hp	5.7	10A	2.5 mm <sup>2</sup>
Motor de alta RPM trifásico de 1hp	2.9	6A	1.5 mm <sup>2</sup>
Motor trifásico de 1HP	1	2A	1.5 mm <sup>2</sup>

**Fuente:** *Elaboración propia*

Esta tabla permite visualizar la distribución de protecciones eléctricas necesarias para cada componente, asegurando un funcionamiento seguro y eficiente del sistema eléctrico.

## CAPITULO III: RESULTADOS

### 3.1. Implementación de hardware, sensores y actuadores

#### 3.1.1. Sensores y Actuadores

Con el objetivo de lograr la automatización de la máquina tostadora de café, se realizó una evaluación del estado actual de los componentes instalados y se procedió a seleccionar e implementar los elementos necesarios para cumplir con los nuevos requerimientos de control automático.

A continuación, se describen las partes del equipo que ya se encontraban en funcionamiento:

- **Motor principal:** La máquina contaba con un motor principal encargado de la rotación del tambor de tostado, permitiendo el movimiento constante de los granos durante el proceso.

#### **Imagen 13.**

*Motor principal*



*Fuente: Elaboración propia*

- **Sistema de transmisión:** El movimiento del motor se transmitía al tambor mediante un sistema compuesto por poleas y fajas, asegurando la rotación adecuada para un tostado uniforme.

**Imagen 14.**

*Sistema de transmisión*

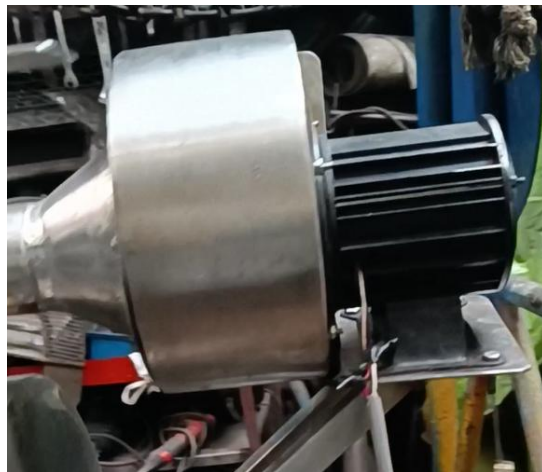


*Fuente: Elaboración propia*

- **Sistema de Ventilación:** Se incluía un ventilador que facilitaba la extracción del humo generado en el proceso y permitía controlar el flujo de aire dentro de la cámara de tostado.

**Imagen 15.**

*Sistema de ventilación*



*Fuente: Elaboración propia*

- **Estructura mecánica:** La estructura estaba compuesta por un tambor de acero inoxidable, una tolva de carga para introducir los granos y una bandeja de enfriamiento para la rápida disminución de temperatura tras el tostado

**Imagen 16.**

*Estructura mecánica*



*Fuente: Elaboración propia*

- **Quemador de gas:** Finalmente, la máquina disponía de un quemador de gas utilizado para el calentamiento directo del tambor, generando la energía térmica necesaria para el proceso.

**Imagen 17.**

*Quemador de gas*



*Fuente: Elaboración propia*

Estos componentes permitían el funcionamiento básico de la máquina de forma manual, sin incorporar automatización ni control automático de parámetros críticos como la temperatura o el tiempo de tostado.

Asimismo, se describen los componentes que fueron seleccionados e implementados para la automatización de la máquina tostadora de café, de acuerdo con el análisis realizado previamente:

- a) **Sensores de temperatura:** Se instaló un sensor PT100 para medir de manera precisa la temperatura del tambor y del ambiente dentro de la cámara de tostado, asegurando un control más preciso del proceso.

**Imagen 18.**

*Sensores de Temperatura*



*Fuente: Elaboración propia*

- b) **Controlador de flama:** Se implementó un sistema de control de flama que permite regular automáticamente la intensidad del quemador de gas, garantizando una fuente de calor estable y ajustable según los requerimientos del perfil de tostado.

**Imagen 19.**

*Controlador de flama*



*Fuente: Elaboración propia*

- c) **Sensor de flama:** Se incorporó un sensor de flama para la detección de la presencia de llama en el quemador, proporcionando una capa adicional de seguridad y retroalimentación al sistema de control.

**Imagen 20.**

*Sensor de flama*



*Fuente: Elaboración propia*

- d) **Sensor de proximidad:** Se añadieron sensores de proximidad para la detección de posición de algunos elementos móviles, contribuyendo a la supervisión automática de la operación de carga y descarga de los granos.
- e) **Actuadores:** Se seleccionaron actuadores eléctricos que permitieran la automatización de ciertas funciones como la apertura de compuertas y el accionamiento del sistema de enfriamiento, optimizando la operación de la máquina

**Imagen 21.**

*Actuadores*



*Fuente: Elaboración propia*

- f) **PLC (Controlador lógico programable):** Finalmente, se integró un PLC como unidad central de control del sistema, encargado de recibir señales de los sensores, procesarlas, y ejecutar las acciones correspondientes sobre los actuadores, permitiendo un funcionamiento automático, confiable y programable del proceso de tostado.

**Imagen 22.**

*PLC (Controlador lógico programable)*



*Fuente: Elaboración propia*

**3.1.2. Pruebas de funcionamiento y calibración**

Antes de realizar pruebas con granos de café, se llevaron a cabo ensayos iniciales para verificar el correcto funcionamiento del sistema:

- Encendido y apagado del sistema: Se probó el procedimiento de inicio, verificando la correcta lectura de sensores.
- Prueba de los actuadores: Se activaron manualmente las resistencias y ventiladores para comprobar su respuesta.
- Verificación de la comunicación: Se aseguró que el PLC recibiera correctamente las señales de los sensores.

Se registraron los tiempos de respuesta del sistema y se realizaron ajustes en la programación para optimizar su funcionamiento.

### 3.1.3. Calibración y sintonización de Control PID

Para garantizar una regulación precisa de la temperatura, se implementó un controlador PID cuyos parámetros fueron ajustados mediante pruebas empíricas:

1. **Prueba de respuesta sin carga:** Se analizó el comportamiento del sistema sin granos de café, ajustando los parámetros iniciales del PID.
2. **Prueba con carga simulada:** Se introdujeron objetos de masa y capacidad térmica similar a los granos para evaluar la estabilidad de la temperatura.
3. **Prueba con granos de café:** Se realizó una primera corrida de tostado, comparando la temperatura real con la curva de referencia.

Se realizaron ajustes en los valores de **P, I y D** para minimizar el error y estabilizar el sistema en el menor tiempo posible.

Se presentan tablas con los valores de calibración y gráficos de respuesta del sistema.

### 3.2. Validar el funcionamiento del sistema en base a los requerimientos

Con el fin de validar el correcto desempeño de la máquina tostadora de café, se realizaron pruebas comparando la temperatura de referencia programada y la temperatura real medida en tres tipos de café: americano, francés e italiano. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada caso:

**a) Café Americano**

Para validar el correcto funcionamiento de la máquina tostadora de café para el tipo de café americano, se realizó una comparación entre la temperatura de referencia programada y la temperatura real medida durante el proceso de tostado. La siguiente tabla muestra los valores registrados minuto a minuto:

**Tabla 16.**

*Valores registrados del Café Americano*

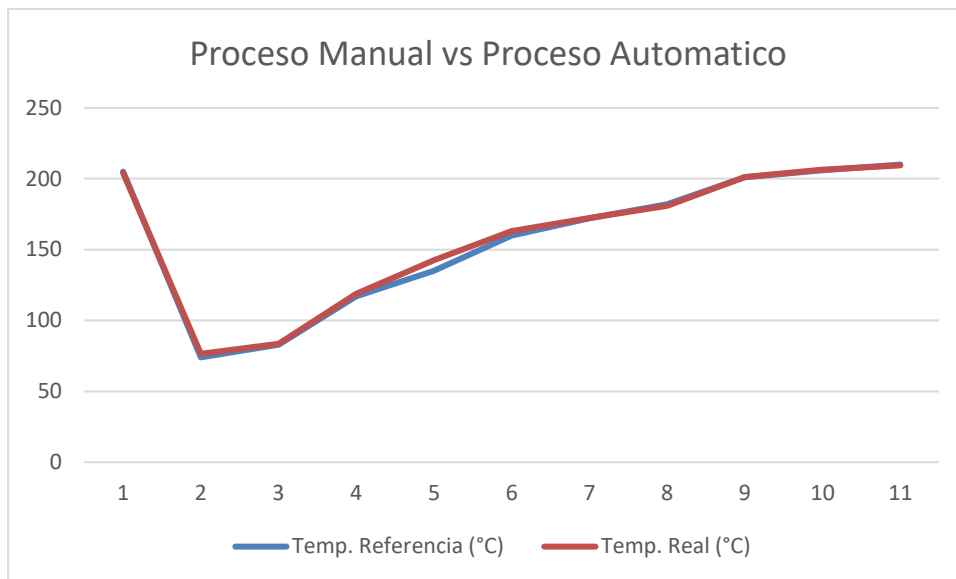
Minuto	Temp. Referencia (°C)	Temp. Real (°C)	Error (%)
0	205	204.1	0%
1	74	76.5	-3%
2	83	83.5	-1%
3	117	118.9	-2%
4	135	142.6	-5%
5	160	163	-2%
6	172	172.4	0%
7	182	181	1%
8	201	201.2	0%
9	206	206.5	0%
10	210	209.4	0%

*Fuente: Elaboración propia*

Se observa que el sistema sigue de manera adecuada la curva de referencia, presentando errores de temperatura muy bajos. Durante los primeros minutos (minuto 1 al minuto 5), se registraron desviaciones máximas de hasta un -5%, atribuibles a la etapa de estabilización térmica inicial del proceso. Posteriormente, a partir del minuto 6, el sistema logra mantener la temperatura real prácticamente igual a la referencia, evidenciando errores de 0% o  $\pm 1\%$ .

**Imagen 23.**

*Proceso Manual vs Proceso automático (CA)*



*Fuente: Elaboración propia*

**b) Café Francés**

En el caso del tostado de café tipo francés, se llevó a cabo nuevamente la comparación entre la temperatura de referencia programada y la temperatura real obtenida durante el proceso.

A continuación, se presenta la tabla con los datos registrados:

**Tabla 17.**

*Valores registrados del Café Francés*

Minuto	Temp. Referencia (°C)	Temp. Real (°C)	Error (°C)
0	210	210	0%
1	75	71.5	5%
2	77	70.1	10%
3	85	80.6	5%
4	100	100.2	0%
5	125	124	1%
6	138	142.5	-3%
7	152	152.8	-1%
8	175	175	0%
9	190	185.8	2%
10	202	200	1%
11	210	210.8	0%
12	218	216.8	1%
13	223	225.9	-1%
14	228	228.9	0%

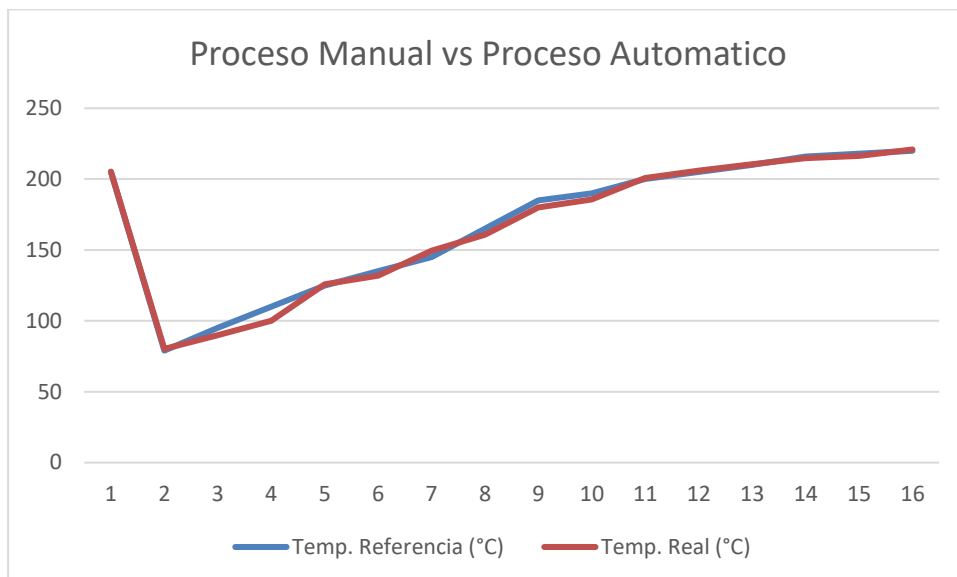
*Fuente: Elaboración propia*

Al analizar los resultados, se observa que durante los primeros minutos (del minuto 1 al minuto 3) se presentan desviaciones mayores, con errores de hasta  $\pm 10\%$ . Estas diferencias son atribuibles al proceso de arranque y calentamiento inicial del sistema. No obstante, conforme avanza el proceso (a partir del minuto 4), el control térmico mejora notablemente, manteniendo los errores dentro de un rango de  $\pm 3\%$ .

A partir del minuto 5 en adelante, la máquina logra estabilizarse, siguiendo de manera precisa el perfil de temperatura establecido, con errores mínimos y sin afectar la calidad del tostado.

## Imagen 24.

*Proceso Manual vs Proceso automático (CF)*



*Fuente: Elaboración propia*

### c) Café Italiano

Finalmente, para el café tipo italiano, se realizó el mismo procedimiento de comparación entre la temperatura de referencia y la temperatura real obtenida. Los datos se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 18.**

*Valores registrados del Café Italiano*

Minuto	Temp. Referencia (°C)	Temp. Real (°C)	Error (%)
0	205	205.2	0%
1	79	80.2	-1%
2	95	90	6%
3	110	100	10%
4	125	125.8	-1%
5	135	132	2%
6	145	149.6	-3%
7	165	160.8	3%
8	185	180	3%

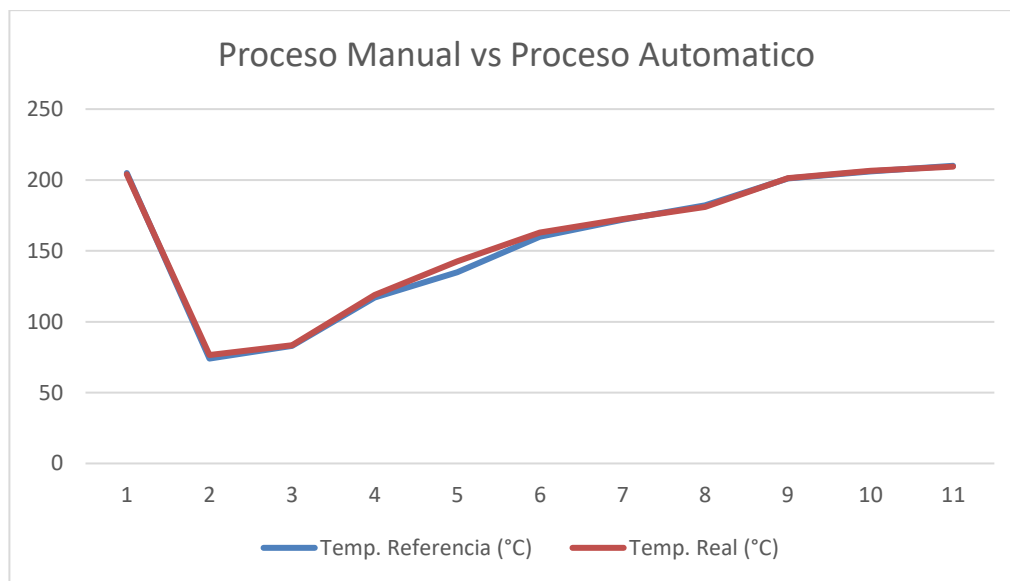
9	190	185.6	2%
10	200	200.7	0%
11	205	205.9	0%
12	210	210.6	0%
13	216	214.9	1%
14	218	216.4	1%
13	220	220.9	0%

*Fuente: Elaboración propia*

Durante las primeras etapas (minuto 1 al minuto 3), se evidencian errores de hasta 10%, debido principalmente al proceso de estabilización inicial. Posteriormente, a partir del minuto 4, el control de temperatura mejora considerablemente, con errores que se mantienen dentro de  $\pm 3\%$ , e incluso alcanzando valores de error nulo (0%) en la mayoría de los registros.

### Imagen 25.

*Proceso Manual vs Proceso automático (CI)*



*Fuente: Elaboración propia*

### 3.2.1. Pruebas de Marcha y Paro

Antes de realizar pruebas con granos de café, se llevaron a cabo ensayos iniciales para verificar el correcto funcionamiento del sistema:

- **Encendido y apagado del sistema:** Se probó el procedimiento de inicio, verificando la correcta lectura de sensores.
- **Prueba de los actuadores:** Se activaron manualmente las resistencias y ventiladores para comprobar su respuesta.
- **Verificación de la comunicación:** Se aseguró que el PLC recibiera correctamente las señales de los sensores.

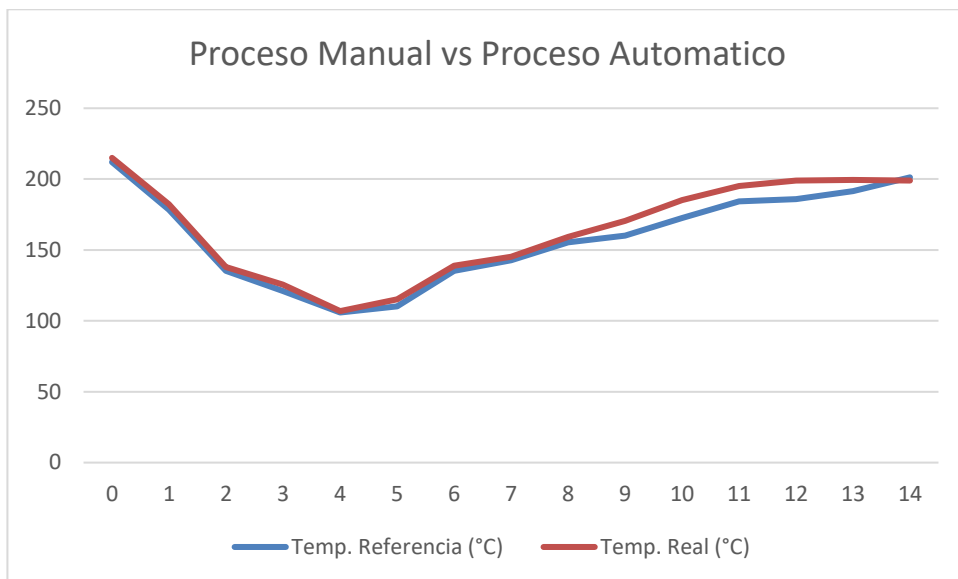
Se registraron los tiempos de respuesta del sistema y se realizaron ajustes en la programación para optimizar su funcionamiento.

Durante el proceso de automatización de la tostadora de café, se realizó una prueba con una duración total de 14 minutos, registrando la temperatura cada minuto. El objetivo fue comparar el perfil de temperatura de referencia, obtenido en un tostado manual previo, con el perfil de temperatura real, medido durante el tostado automático mediante el sistema de control PID.

A continuación, se presenta la imagen comparativa:

**Imagen 26.**

*Proceso Manual vs Proceso automático*



*Fuente: Elaboración propia*

El sistema automático logra seguir con bastante precisión el perfil de temperatura definido manualmente. Sin embargo, se presentan ligeras desviaciones, especialmente en la fase media del proceso (minuto 9 al 13), donde el error alcanza valores de hasta  $-3^{\circ}\text{C}$ . Esto puede deberse al retardo térmico del sistema o a la respuesta del controlador PID.

El error promedio se mantiene dentro de un rango aceptable, lo cual demuestra que la automatización implementada replica adecuadamente el comportamiento del proceso manual.

Los resultados obtenidos confirmaron que el sistema mantiene una estabilidad térmica adecuada, permitiendo replicar perfiles de tostado de manera consistente.

## CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1. Discusión

#### 4.1.1. Limitaciones

El presente proyecto enfrenta limitaciones como la inversión en tecnología avanzada y sobre todo está la necesidad de calibrar de manera correcta los sensores para replicar los perfiles de temperatura.

- Inversión en tecnología: Para la implementación como los sistemas de control PID, se requiere inversión para la adquisición de equipos y software, generando obstáculo.
- Calibración de sensores: Ante cualquier error que se presente en la calibración de sensores puede afectar significativamente la calidad del tostado de café.
- Condiciones ambientales: La variabilidad en los factores de temperatura y humedad del entorno donde se ejecuta la producción influye radicalmente en el proceso del tostado.

Por otro lado, tenemos como limitación la recopilación y análisis de datos debido a que no permitió al inicio realizar un mejor análisis de los valores.

#### 4.1.2. Recomendaciones

Se recomienda iniciar un plan piloto con baja escala de producto de café para probar y ajustar el sistema antes de que sea implantado a gran escala, de esa manera se maximiza

la efectividad del sistema, con el objetivo de mejorar la calidad del producto y lograr una transición favorable hacia la automatización.

- Un sistema de monitoreo para la visualización de parámetros durante el proceso de tostado, del sistema de control PID en la calibración y validación de los sensores, nos garantiza mejor precisión en los perfiles de temperatura.
- Implementar un procedimiento escrito de trabajo seguro (PETS) para el desarrollo de la máquina automatizada de tostado de café.
- Implementar manual de operación y programa de mantenimiento preventivo de la máquina tostadora de café.
- Capacitación al personal sobre el uso adecuado y mantenimiento del nuevo sistema.

#### **4.1.3. Conclusiones**

Este trabajo es desarrollado por la importancia que tiene el sector agroindustrial en el Perú, siendo una de las principales fuentes de empleo. Además, trata de un sistema semejante a los que utilizan.

- La mejora en la consistencia del producto, con la automatización del proceso de tostados a través de un control PID, permite precisión en perfiles de temperatura con resultados de beneficiosos y de alta calidad el producto.
- La implementación de un sistema automatizado reduce los tiempos de producción como optimiza el uso de recursos, generando eficiencia operativa.

“DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE TOSTADO DE CAFÉ MEDIANTE UN CONTROL PID PARA REPLICAR DE FORMA PRECISA UN PERFIL DE TEMPERATURA OBTENIDO DE UN PROCESO MANUAL EN UNA EMPRESA DEL SECTOR AGROINDUSTRIAL EN LIMA”

- La flexibilidad y adaptabilidad ante un sistema automatizado con buen diseño, permite que la empresa tenga mayor demanda de solicitud en el producto por la calidad del producto.
- Por último la automatización contribuye en las prácticas sostenibles de producción en café, en la mejora eficiencia energética.

## REFERENCIAS

Acero, W. (2007). *Diseño e implementación de un controlador automático para la tostación del café en pequeña y media producción*. [Tesis de Título Profesional, Universidad de la Salle].

[https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1045&context=ing\\_automatizacion](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1045&context=ing_automatizacion)

Arciniega, J (2016). *Diseño, simulación, y propuesta de automatización de una máquina de café con capacidad de 25lb, para tostado-enfriado, dirigida a la producción cafetalera*. [Tesis de Título Profesional, Universidad Nacional de Loja].

<https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/17577/1/Arciniega%20Cuenca%20Juan%20Jos%C3%A9.pdf>

Arias, J., & Covinos, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación. Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica*. doi:<https://doi.org/http://hdl.handle.net/20.500.12390/2260>

Ayala, E. (2022). *Diseño de un sistema automatizado para una tostadora de café con capacidad de 25 kg*. Ecuador. Obtenido de [https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/25885/1/EdisonJavier\\_AyalaEspinoza.pdf](https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/25885/1/EdisonJavier_AyalaEspinoza.pdf)

Cámara Peruana del café y Cacao (diciembre de 2017). *Estudio de mercado*

*del café peruano – Posición Internacional y el segmento de café sostenible.*

<https://camcafeperu.com.pe/admin/recursos/publicaciones/Estudio-de-mercado-del-cafe-peruano.pdf>

Castellanos, A., & Castillo, E. (2017). *Diseño e implementación de un sistema automatizado para control de temperatura y tiempo en tostadoras convencionales de café.* Colombia. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/12683/111055%206592.pdf?sequence=1>

Chaves, L. (Junio de 2009). El Café tostado y molido: caracterización de la industria torrefactora nacional. *Umbral Científico*(14), 98-106. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/304/30415059009.pdf>

Coello, V. (2023). *Diseño y construcción de una máquina tostadora de café con capacidad de 3 kg utilizando una fuente energética de biomasa (pellets).* [Tesis de Título Profesional, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/19675/1/15T00873.pdf>

Fórum Café (septiembre de 2020). Café de Perú. *Junta Nacional del Café.* <https://juntadelcafe.org.pe/wp-content/uploads/2020/09/Elcafe%CC%81dePru%CC%81.pdf>

Gamboa, W., Benítez, S., Rueda, F., Acuña, N., Blanco, E., Retamoso, A., y Rincón, F. (enero de 2008). Diseño y construcción de un prototipo automatizado para

la torrefacción de café. *Revista Matices Tecnológicos*, No. 1, Pág. 12-19.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8994082>

García, P., & Barreto, D. (2007). *Propuesta para el incremento de consumo de café tostado de los asociados de la Junta Nacional del Café*. Lima. doi:10.13140/RG.2.1.2324.7522

Gómez, J. (2021). *Máquina de tostar café para uso doméstico*. Barcelona. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/359076/M%C3%81QUINA%20DE%20TOSTAR%20CAF%C3%89%20PARA%20USO%20DOM%C3%89STICO.pdf>

Gotteland, M., & De Pablo, S. (Junio de 2007). Algunas verades sobre el café. *Revista Chilena de nutrición*, 34(2), 105-115. doi:http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182007000200002

Guevara, G., Verdesoto, A., & Castro, N. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *Recimundo*, IV(3), 163-173. doi:10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173

Jiménez, L. (Marzo-Agosto de 2020). Impacto de la investigación cuantitativa en la actualidad. *Convergence Tech Revista Científica*, IV(1), 59-68. Obtenido de

[https://www.researchgate.net/publication/352750927\\_IMPACTO\\_DE\\_LA\\_INVESTIGACION\\_CUANTITATIVA\\_EN\\_LA\\_ACTUALIDAD](https://www.researchgate.net/publication/352750927_IMPACTO_DE_LA_INVESTIGACION_CUANTITATIVA_EN_LA_ACTUALIDAD)

Koh, S. (septiembre de 2019). Descubriendo la Historia de la tostadora de café.

*Perfect Daily Grind*. <https://perfectdailygrind.com/es/2019/09/25/descubriendo-la-historia-de-la-tostadora-de-cafe/>

Lazcano, E., Pascual, S., Trejo, M. & Vargas, M. (2016). Efecto del grado de tostado en granos de café de diferentes regiones productoras de México sobre el contenido de compuestos fenólicos, cafeína y la actividad antioxidante. *Investigación y Desarrollo en Ciencias y Tecnología de Alimentos*, Vol. 1, No.1, Pág. 478-483.

<http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume1/1/3/82.pdf>

Medina, A., & Arias, O. (2020). *Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café para el beneficiadero “La Esperanza”, en el municipio La Plata, Huila*. Colombia.

Obtenido de <https://repositorio.uan.edu.co/server/api/core/bitstreams/fb72d6c8-a8d2-4386-948d-bee2db716ffb/content>

Meléndez, E. (2009). *Construcción de un tostador de granos de café (Coffea arábica)*. [Tesis de Título Profesional, Universidad Nacional del Antiplano].

[https://www.repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/3349/Mel%  
%a9ndez\\_Tohalino\\_Elvio.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/3349/Mel%c3%a9ndez_Tohalino_Elvio.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Montalvo, J., & Morocho, W. (2011). *Diseño e implementación de un sistema scada para control del proceso de un módulo didáctico de montaje festo utilizando PLC y una pantalla HMI, caso práctico: en el laboratorio de automatización de la FIE.* Ecuador. Obtenido de <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/1329/1/108T0006.pdf>

Porras, M., Vargas, G., Araúz, L., & Abarca, Y. (Abril de 2019). Efecto de la temperatura en la rapidez del tostado de café. *Tecnología en Marcha, XXXII*, 20-27. doi:10.18845/tm.v32i7.4255

Portillo, O. (2022). El procesamiento del grano de café. Del tueste a la infusión. *Revista Bionatura, 7(3)*, 1-20. doi:10.21931/RB/2022.07.03.18

Quijada, V., & Ccencho, M. (2024). *Desarrollo de un sistema automatizado para la extracción de pectina a partir de las cáscaras de cacao.* Lima. doi:http://doi.org/10.19083/tesis/673808

Ramos, C. (Julio - Diciembre de 2020). Los alcances de una investigación . *CienciAmérica, IX(3)*. doi:http://dx.doi.org/10.33210/ca.v9i3.336

Rincones, C. (mayo del 2017). *Diseño de prototipo a escala de tostadora de café.* [Tesis de Título Profesional, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/5be8a88c-38bf-4c94-b743-ef7460b01c32/content>

Rojas, D. (noviembre del 2021). *Diseño de un sistema automatizado basado en lógica difusa para el proceso de tueste de café en la empresa Momotus Café S.A.S.*

[Tesis de Título Profesional, Corporación Universitaria Autónoma del Cauca].

<https://repositorio.uniautonoma.edu.co/bitstream/handle/123456789/629/T%20E-M%20081%202021.pdf?sequence=1>

Saballos, W. (noviembre de 2018). *Propuesta de extracción de aceite, de café (coffea arábica), a escala laboratorio de la asociación nacional del café (ANACAFÉ).* [Tesis de Título Profesional, Universidad de San Carlos de Guatemala].

<http://www.repositorio.usac.edu.gt/11549/1/William%20Manuel%20Saballos%20MORALES.pdf>

Sánchez, I., Del Ángel, J., & Juárez, O. (Julio - Diciembre de 2020). Influencia de la temperatura de tostado de diversas mezclas de café Coffea Arábica y café Coffea Robusta. *Revista Electrónica sobre Tecnología, Educación y Sociedad*, VII(14), 1-19.

Uriarte, B., & Gómez, M. (2024). *Diseño mecatrónico de una tostadora de café de lecho fluidizado para productores minoristas.* Ecuador. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27089/1/UPS-CT011229.pdf>

Vivanco, J. (julio del 2022). *Estudio de prefactibilidad para la instalación de*

“DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE TOSTADO DE CAFÉ MEDIANTE UN CONTROL PID PARA REPLICAR DE FORMA PRECISA UN PERFIL DE TEMPERATURA OBTENIDO DE UN PROCESO MANUAL EN UNA EMPRESA DEL SECTOR AGROINDUSTRIAL EN LIMA”

*una planta de producción de café de la selva alta en empaques para el mercado*

*nacional.* [Tesis de Título Profesional, Universidad de Lima].

[https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/16452/Vivanco\\_Est](https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/16452/Vivanco_Est)

[udio-caf%C3%A9-mercado-nacional.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/16452/Vivanco_Estudio-caf%C3%A9-mercado-nacional.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

## CAPÍTULO V: ANEXOS

### V. ANEXO 01:

***MATERIALES DE LA TOSTADORA  
MANUAL DE LA EMPRESA SEÑOR  
CAUTIVO DE AYABACA (ANEXO 1)***

“DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE TOSTADO DE CAFÉ MEDIANTE UN CONTROL PID PARA REPLICAR DE FORMA PRECISA UN PERFIL DE TEMPERATURA OBTENIDO DE UN PROCESO MANUAL EN UNA EMPRESA DEL SECTOR AGROINDUSTRIAL EN LIMA”

N°	MAQUINA TOSTADORA	MATERIALES	ESPESOR		MEDIDA		UNID.	MEDIDA	CANTIDAD	TOTAL	UNIDAD
	PIEZAS		mm	pul	mm	pul					
1	Estructura	PLANCHA	4	5/32	26	65	cm	1690	1	1690	cm2
		PLANCHA	4	5/32	6	90	cm	540	1	540	cm2
		PERFIL L	2	5/64	25x25		mm	40	2	80	cm
		PLANCHA	4	5/32	17	6	cm	102	2	204	cm2
		TUBO CUADRANGULAR	1.5	1/16	50x50		mm	50	1	50	cm
		PLANCHA	4	5/32	54	107	cm	5778	2	11556	cm2
		PLANCHA	1.2	1/20	17	13	cm	221	2	442	cm2
		PLANCHA	1.2	1/20	240	60	cm	14400	2	28800	cm2
2	Aspa	PLANCHA	1.5	1/16	65	4	cm	260	5	1300	cm2
3	Tolva	PLANCHA	1.5	1/16	100	45	cm	4500	1	4500	cm2
		PLANCHA	1.5	1/16	15	40	cm	600	2	1200	cm2
		PLANCHA	1.5	1/16	88	10	cm	880	1	880	cm2
		PLANCHA	3	1/8	17	14	cm	238	2	476	cm2
		EJE	-		9.53	3/8	∅ ext	25	1	25	cm
		TUBO REDONDO	1.5	1/16		73mm	∅ ext	20	1	20	cm
	Esparrago	SE COMPRA	-		15	5/8	∅ ext	5	4	20	cm
4	Ventilador	EJE	-		9.53	3/8	∅ ext	30	4	120	cm
		PLANCHA (hueco 3.5mm)(distan 10mm)	1.5	1/16	50	50	cm	2500	1	2500	cm2
		PERFIL L	2	5/64	25x25		mm	30	6	180	cm
		PLANCHA	1.5	1/16	28	80	cm	2240	1	2240	cm2
5	Tapa	EJE	-		9.53	3/8	∅ ext	35	1	35	cm
		TUBO REDONDO	1.5mm	1/16		1/2 ∅ ext	20	1	20	cm	
		PLANCHA	4	5/32	24	15	cm	360	1	360	cm2
		PLANCHA	4	5/32	60	60	cm	3600	1	3600	cm2
6	Chimenea	TUBO REDONDO	1.5	1/16		73mm	∅ ext	70	1	70	cm
		PLANCHA	1.5	1/16	14	90	cm	1260	1	1260	cm2
		PLANCHA	1.5	1/16	30	30	cm	900	1	900	cm2
7	Tambor	PLANCHA	2	5/64	125	55	cm	6875	1	6875	cm2
		PLANCHA	1.2	1/20	55	55	cm	3025	1	3025	cm2
	Bocina	SE COMPRA	27 ∅ int		60 ∅ ext		mm	-	1	-	-
8	Eje	EJE	-		27	1	∅ ext	70	1	70	cm
9	Piñon	J						-	1	-	-
10	Válvula de gas	SE COMPRA						-	1	-	-
11	Interruptor ON OF	SE COMPRA						-	1	-	-

“DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE TOSTADO DE CAFÉ MEDIANTE UN CONTROL PID PARA REPLICAR DE FORMA PRECISA UN PERFIL DE TEMPERATURA OBTENIDO DE UN PROCESO MANUAL EN UNA EMPRESA DEL SECTOR AGROINDUSTRIAL EN LIMA”

12	Motor	SE COMPRA								
		SE COMPRA								
		SE COMPRA	MONOFASICO			2HP	-	1	-	-
13	Cable vulcanizado	SE COMPRA	3 hilos			#14	2	1	2	m
		SE COMPRA					-	1	-	
15	Pernos y roscas	SE COMPRA (cabeza hexagonal)	3/4 " long	6mm ancho		-	4	-	-	
		SE COMPRA (cabeza hexagonal)	2 " long	6mm ancho		-	4	-	-	
		SE COMPRA (cabeza hexagonal)	1 1/4" long	9mm ancho		-	4	-	-	
		SE COMPRA (esparrago allen)	3/4 " long	6mm ancho		-	2	-	-	
16	Chumacera de piso	SE COMPRA	FL 204				-	2	-	-
		SE COMPRA	PG 11				-	2	-	-
18	Rodaje	SE COMPRA	Diametro interno de 25cm				-	1	-	-

**Fuente:** Señor Cautivo de Ayabaca

## **V. ANEXO 02:**

# ***MATERIALES DEL DISPOSITIVO ELECTRÓNICO PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE LA MÁQUINA TOSTADORA DE CAFÉ***

“DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE TOSTADO DE CAFÉ MEDIANTE UN CONTROL PID PARA REPLICAR DE FORMA PRECISA UN PERFIL DE TEMPERATURA OBTENIDO DE UN PROCESO MANUAL EN UNA EMPRESA DEL SECTOR AGROINDUSTRIAL EN LIMA”

MATERIALES	Placa Electrónica	Procesador	ESP32 WROOM
		Amplificador de PT100	LM358
			Resistencia de 100 ohm
			Resistencia de 1K ohm
		Output	Led rojo
			PC817
			2n3904
			Diodo 4004
	Fuente de Alimentación	Relé 5v	
		Convertor de 220AC - 24DC	
		Convertor de 24DC a 5DC	
	Entrada Pull Down	Resistencia de 10k ohm	
	Bornera de 3		
	Tablero Electrónico	Llave termomagnética Contactor trifásico Guarda Motor Botón start Botón stop Pantalla LCD Led verde (START) Led rojo (STOP)	
	Maquina Tostadora	MotorDC 24V Límite de carrera PT 100 Chispero electrónico Motor Reductor de 2HP 1500 RPM	

*Fuente: Elaboración propia*