



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

**SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA DE UNA MÁQUINA TOSTADORA
DE CAFÉ ALIMENTADA CON GAS LICUADO DE PETRÓLEO**

Trabajo de grado previo a la obtención del título de ingeniero en mecatrónica

Autor:

Cristian Daniel Castillo Rivera

Director:

Ing. Milton Alejandro Gavilánez Villalobos, MSc.

Ibarra – Ecuador

2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual tengo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100407498-3		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Castillo Rivera Cristian Daniel		
DIRECCIÓN:	Mira – Carchi – Ecuador		
EMAIL:	cdcastillor1@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062280445	TELÉFONO MÓVIL:	0959560122

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA DE UNA MÁQUINA TOSTADORA DE CAFÉ ALIMENTADA CON GAS LICUADO DE PETRÓLEO
AUTOR (ES):	Castillo Rivera Cristian Daniel
FECHA: DD/MM/AAAA	31 de julio de 2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Milton Alejandro Gavilánez Villalobos, MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 31 días del mes de julio de 2023

EL AUTOR:

(Firma).....

Nombre: ..Cristian Castillo



Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Certificación del director del trabajo de grado

En mi calidad de director del trabajo de grado “SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA DE UNA MÁQUINA TOSTADORA DE CAFÉ ALIMENTADA CON GAS LICUADO DE PETRÓLEO”, presentado por el egresado Cristian Daniel Castillo Rivera, que opta por el título de ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, 28 de julio de 2023

Ing. Milton Alejandro Gavilanez Villalobos, MSc.

Director de Tesis

Agradecimientos

Agradezco de todo corazón...

A Dios por haberme dado la vida y la fuerza que necesité para así poder llegar hasta el final de mi carrera enfrentando situaciones que parecían que ya no tenían remedio, logré nunca perder mi fe y así pude llegar hasta el final de la realización del presente trabajo.

Agradezco profundamente al Msc. Milton Gavilánez por su inestimable guía y paciencia como mi director de tesis. Valoro enormemente su calidad humana y su apoyo incondicional a lo largo de todo el proceso. Su experiencia y conocimientos han sido de gran valor para enriquecer este proyecto y me siento privilegiado de haber contado con su orientación y respaldo.

A mis padres, Marcelo y Genny, que con sus enseñanzas, amor y paciencia me han brindado el beneficio de poder llegar a ser un buen hombre con valores y principios para ser alguien hecho y derecho en la vida.

A mi madrina Mariela y mis abuelitos Alfonso y Luisa por confiar en mí y darme la oportunidad de culminar esta etapa en mi vida,

A mi novia, Eva Guerrero, que con su amor incondicional ha sabido entenderme y brindarme la fortaleza cuando todo parecía acabarse logrando así que pueda culminar con éxito mi carrera profesional.

Finalmente, agradezco a cada uno de los ingenieros que con su paciencia y sabiduría inculcada dentro de las aulas me han podido guiar hasta el último momento en el transcurso de mi carrera.

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a:

Mis padres por ser el componente más importante en mi vida y demostrarme siempre su cariño y su apoyo incondicional.

A mis abuelitos que después de mis padres se preocupaban por mí y me han sabido guiar por el buen camino para llegar a ser la persona que soy hoy en día.

A don Félix Méndez, por haberme dado la confianza y haberme abierto las puertas para poder así lograr las pruebas que necesitaba para poder llegar a la culminación del presente trabajo de grado.

A mi novia, que como compañera de vida, con su amor incondicional me ha brindado la fuerza necesaria para poder seguir creciendo en cada aspecto de mi vida profesional.

Resumen

El presente proyecto de tesis tiene como objetivo desarrollar un sistema de control de temperatura automatizado destinado a una máquina tostadora de café que utiliza gas licuado de petróleo como fuente de alimentación. La propuesta busca mejorar la calidad del producto final del tostado del café, al tiempo que se busca aumentar tanto la eficacia como la eficiencia del proceso de tueste.

El trabajo de investigación se inicia con la selección del sensor adecuado para realizar la regulación de la temperatura en el sistema. La adquisición de datos del sensor se llevará a cabo durante el proceso de calentamiento de la máquina. Durante esta fase, se tomarán las mediciones necesarias para evaluar el comportamiento térmico y establecer los parámetros óptimos para la regulación de la temperatura.

Posteriormente, se procede a realizar la programación de todos los procesos en secuencia, incluyendo el control de temperatura mediante un controlador PID. La programación se lleva a cabo para garantizar el correcto funcionamiento y la coordinación de cada una de las etapas del proceso. El control de temperatura mediante un controlador PID es fundamental para mantener la temperatura dentro de los rangos deseados durante todo el proceso.

Finalmente, se procede a realizar pruebas exhaustivas en una máquina tostadora de café real para comprobar el funcionamiento del módulo de control de temperatura implementado. Durante estas pruebas, se verifica el desempeño del sistema en diversas condiciones y se evalúa su capacidad para mantener la temperatura dentro de los rangos deseados durante el proceso de tueste.

Summary

The objective of this thesis project is to develop an automated temperature control system for a coffee roasting machine that uses liquefied petroleum gas as a power source. The proposal seeks to improve the quality of the final product of coffee roasting, while seeking to increase both the effectiveness and the efficiency of the roasting process.

The research work begins with the selection of the appropriate sensor to regulate the temperature in the system. The sensor data acquisition will take place during the warm-up process of the machine. During this phase, the necessary measurements will be taken to evaluate the thermal behavior and establish the optimal parameters for temperature regulation.

Subsequently, we proceed to carry out the programming of all the processes in sequence, including the temperature control by means of a PID controller. The programming is carried out to guarantee the correct functioning and the coordination of each one of the stages of the process. Temperature control through a PID controller is essential to maintain the temperature within the desired ranges throughout the process.

Finally, exhaustive tests are carried out on a real coffee roasting machine to verify the operation of the implemented temperature control module. During these tests, the performance of the system under various conditions is verified and its ability to maintain the temperature within the desired ranges during the roasting process is evaluated.

Índice de Contenidos

Capítulo I Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Justificación	2
1.4. Alcance.....	3
Capítulo II Marco Referencial	4
2.1. Antecedentes	4
2.2. Marco teórico	5
2.2.1. Tostadores de Café	5
2.2.2. Válvulas.....	7
2.2.3. Automatización industrial	8
2.2.4. Algoritmo de control PID.....	9
2.2.5. Estructura del controlador PID	10
2.2.6. Reglas de ajuste clásicas para controladores PID.....	11
2.2.7. Sensores de Temperatura.....	14
2.2.8. Tipos de sensores de temperatura.....	14
2.2.9. Protocolos de comunicación	17
2.2.10. Servomotores	18
2.2.11. Modulación por ancho de pulso para control de servomotores.....	19
2.2.12. Arduino Nano.....	20
Capítulo III Marco Metodológico.....	22
3.1. Modelo de la investigación	22
3.2. Diseño de la investigación	23

Capítulo IV Implementación Y Resultados.....	27
4.1. Requerimientos.....	27
4.2. Recursos disponibles.....	28
4.3. Diagrama de bloques.....	28
4.4. Matriz morfológica	29
4.5. Selección de alternativa.....	30
4.5.1. Matriz de priorización para cada criterio.....	31
4.5.2. Matriz de priorización para el criterio de costo.....	32
4.5.3. Matriz de priorización para el criterio de vida útil.	32
4.5.4. Matriz de priorización para el criterio de fiabilidad de medición.	33
4.5.5. Matriz de priorización para el criterio de procesamiento de datos.....	33
4.5.6. Selección de la mejor alternativa ponderada.	34
4.6. Descripción de componentes	34
4.6.1. Arduino Nano.....	34
4.6.2. Sensor Termopar Tipo K.....	35
4.7. Conexión de sensores y actuadores a la placa.....	36
4.8. Programación	36
4.9. Estructura de protecciones del sistema.....	37
4.9.1. Base para el circuito electrónico	38
4.9.2. Cuadro para la pantalla LCD 20x4.....	38
4.9.3. Base para acople del servomotor con válvula de gas.....	39
4.10. Anclaje de los elementos.....	39
4.10.1. Implementación de la termocupla tipo K.....	39
4.10.2. Implementación del actuador.....	40
4.10.3. Implementación del gabinete de control	40
4.11. Funcionamiento.....	40
4.12. Manejo y mantenimiento del sistema	44
4.12.1. Manejo	44
4.12.2. Mantenimiento del sistema.....	44
Capítulo V Conclusiones y Recomendaciones	45
5.1. Conclusiones	45
5.2. Recomendaciones	46
Referencias	47
Anexos	50

Índice de Figuras

Figura 2.1. Partes de una tostadora de café.	6
Figura 2.2. Envases de Gas Licuado de Petróleo [8].	7
Figura 2.3 Válvula reguladora industrial sanper [10].	7
Figura 2.4 Pirámide de automatización [13].	9
Figura 2.5. Sistema de control utilizando un controlador PID [16].	10
Figura 2.6. Curva de respuesta en forma de S [22].	13
Figura 2.7. Oscilación sostenida con periodo P_{cr} [22].	13
Figura 2.8. Curva de calibración típica de un RTD [26].	15
Figura 2.9. Curva de calibración típica de un termistor [26].	15
Figura 2.10. Termopar tipo J de uso común [29].	16
Figura 2.11. Termopar tipo K con vástago [29].	17
Figura 2.12. Imagen de un servomotor [32].	18
Figura 2.13. Giro del servomotor [34].	19
Figura 2.14. Estructura interna de la placa Arduino Nano [36].	20
Figura 2.15. Entorno de programación Arduino IDE [37].	21
Figura 4.1. Máquina tostadora de café usada en este proyecto.	28
Figura 4.2. Diagrama de bloques del sistema.	28
Figura 4.3. Placa Arduino Nano. [36].	34
Figura 4.4. Termocupla tipo K [39].	35
Figura 4.5. Diagrama de conexión del sistema de control del proyecto	36
Figura 4.6. Diagrama de flujo	37
Figura 4.7. Base para el circuito electrónico.	38
Figura 4.8. Cuadro para la pantalla LCD 20x4.	38
Figura 4.9. Base para acople del servomotor con válvula de gas.	39
Figura 4.10. Centro del eje del tambor para el Ingreso de la termocupla tipo K.	39
Figura 4.11. Gabinete de control del sistema.	40

Figura 4.12. Dispositivo para la medición de la humedad del café.....	41
Figura 4.13. Curva de temperatura en tiempo real.	42
Figura 4.14. Curva de temperatura durante el precalentamiento de la tostadora.	43
Figura 4.15. Curva de temperatura durante el tostado de café.....	43

Índice de tablas

Tabla 2.1. Regla de sintonía de Ziegler Nichols basada en la respuesta del primer método [23].....	13
Tabla 2.2. Regla de sintonía de Ziegler Nichols basada en la respuesta del segundo método [23].	14
Tabla 4.1. Matriz morfológica.	29
Tabla 4.2. Matriz de priorización para cada criterio.....	31
Tabla 4.3. Matriz de priorización para el criterio de costo.....	32
Tabla 4.4. Matriz de priorización para el criterio de vida útil.	32
Tabla 4.5. Matriz de priorización para el criterio de fiabilidad de medición.....	33
Tabla 4.6. Matriz de priorización para el criterio de procesamiento de datos.	33
Tabla 4.7. Selección de la mejor alternativa ponderada.....	34
Tabla 4.8. Especificaciones técnicas del Arduino Nano [36].....	34
Tabla 4.9. Especificaciones técnicas de Termopar tipo K [39].....	35
Tabla 4.10. Piezas de protección y acople.....	38
Tabla 4.11. Variables para el control PID.....	42

Capítulo I

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

La ineficiencia en la explotación del grano del café ha hecho que los productores cafetaleros busquen alternativas para la mejora de la productividad en el proceso de tostado. Los productores han optado en el uso de máquinas tostadoras de café, pero al ser tratadas manualmente provoca una falta de homogeneidad en el tostado y a su vez hace que el producto no tenga un sabor ni aroma uniforme.

Esto se debe a que en estas máquinas realizan deficientemente varios procesos manuales que son esenciales para un mejor tostado del café. Entre los principales se tiene la verificación de temperatura durante el tueste del cual nos basaremos para la mejora que quedará especificado en el lapso de este proyecto.

Debido a la inexistencia de un medio adecuado que permita determinar y a su vez controlar la temperatura de tueste se determinó implementar el control de temperatura para el tostado adecuado del café proporcionando incrementar la eficacia y eficiencia del tueste.

Por lo tanto, para estos procesos es necesario implementar un sistema de control de temperatura automatizada para así generar mejor calidad en el resultado final que contribuyan a los tostadores a la realización de un mejor tueste, ajustando la temperatura para la obtención de buenos resultados.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Implementar un sistema de control de temperatura automático en una máquina tostadora de café.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Definir los parámetros de tostado, señales de entrada y salida que tiene la máquina tostadora de café.
- Determinar el sistema de control basados en parámetros funcionales y requerimientos.
- Implementar el sistema de control de temperatura incluyendo protecciones y alarmas.
- Validar el funcionamiento del sistema de control de temperatura en una máquina tostadora de café real.

1.3. Justificación

Hoy en día la situación que atraviesa el Ecuador ha dado lugar a fortalecerse en muchas áreas, una de ellas es la caficultura. En la actualidad si se quiere ser competitivo hay que tener buenas estrategias, es decir producir y ofrecer productos de buena calidad. Por esta razón, la elaboración del presente proyecto es una alternativa que los caficultores puedan mejorar la calidad del tostado del café.

La implementación de este control de temperatura en las máquinas tostadoras de café permite controlar automáticamente el flujo de gas y la temperatura interna en el sistema de una manera exacta y estable, que son características que deben tenerse en cuenta en el proceso de tostado del café, con el fin de ayudar a optimizar el proceso, proporcionando condiciones necesarias para realizar el tueste del café con un alto nivel en cuanto a la homogeneidad y calidad del producto.

Los beneficiarios directos de este proyecto son los propietarios de máquinas tostadoras de café que mediante la implementación de este sistema de control de temperatura tiene como finalidad optimizar periodos de tiempo en el proceso de tueste.

1.4. Alcance

De manera general, el desarrollo y ejecución del presente proyecto tiene como finalidad implementar un módulo de control de temperatura que permita tratar la señal de entrada que emite el sensor en el proceso que realiza una máquina tostadora de café, y generar una salida analógica con la cual puede ser tratada garantizando así el tostado uniforme del producto. Para lo cual, este proceso consta de un ciclo de programación en un dispositivo de control, obteniendo la información de la temperatura de trabajo por medio de una termocupla lo cual permite el control de la servoválvula que hace posible determinar el calentamiento adecuado que necesita el tostado de café.

Capítulo II

Marco Referencial

2.1. Antecedentes

Luis Darío Buesaquillo Imbaquingo [1] ha llevado a cabo el desarrollo de un sistema de control con el propósito de mejorar el rendimiento de una máquina tostadora de café. Su proyecto de grado se enfocó en la implementación del control de los diversos procesos secuenciales que la máquina de tostado de café en la cual trabajó. Para lograr este objetivo, Luis diseñó y construyó un módulo de control funcional que tiene como objetivo facilitar y automatizar los distintos procesos inherentes al tostado del café.

Jeniffer Pamela Pozo Enríquez [2] ha llevado a cabo el desarrollo del diseño y construcción de un tostador para el café de quinua. Este tostador opera mediante el uso de resistencias eléctricas como fuente de energía y tiene una capacidad de tostado de hasta 25 libras. El propósito principal de esta máquina tostadora es obtener un café de quinua más homogéneo, cumpliendo con los requerimientos y condiciones necesarios para lograr dicho objetivo. Jennifer ha enfocado sus esfuerzos en asegurar que el tostado del café de quinua se realice de manera uniforme y controlada, lo que contribuirá a mejorar la calidad y consistencia del producto final.

Juan José Arciniega Cuenca [3] ha llevado a cabo un proyecto técnico que comprende el desarrollo del diseño, simulación y propuesta de automatización de una máquina de café con

capacidad de 25 libras, orientada a la producción cafetalera. El proyecto inició con una investigación exhaustiva que abarcó diversas fuentes bibliográficas para adquirir un conocimiento profundo de las características generales del café. Esta investigación fue fundamental para poder seleccionar la máquina más adecuada para el proceso de tostado del café y asegurar que cumpla con los estándares y requisitos específicos para obtener un tostado de alta calidad. Se realizaron análisis detallados de los diferentes tipos de café, sus propiedades físicas y químicas, y los aspectos clave del proceso de tostado. Con base en esta información, se establecieron los requerimientos esenciales que la máquina de café debería cumplir para lograr un tostado óptimo y consistente.

Jefferson Iván Chugá Chamorro [4] llevó a cabo un estudio de evaluación de los parámetros críticos de tiempo, temperatura y las variedades de café arábica *Coffea arabica* Castillo y Típica durante el proceso de tostado. Su trabajo se enfocó en analizar específicamente dos variedades de café, con el propósito de investigar las transformaciones físico-químicas y sensoriales que ocurren durante el proceso de tostado de café. El objetivo principal de este estudio fue abordar las necesidades del mercado y lograr posicionar las variedades de café en cuestión de manera exitosa para su comercialización. Para alcanzar este objetivo, Jefferson examinó detalladamente cómo las variaciones en los parámetros de tiempo y temperatura impactan en las características físicas y químicas de las variedades de café durante el proceso de tostado.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Tostadores de Café

Durante siglos, el proceso de tostado de café se realizaba de manera sencilla, utilizando una "sartén" colocada sobre el fuego, lo que permitía a los consumidores tostar el café justo antes de prepararlo en sus hogares. Sin embargo, con el surgimiento de la industria y el crecimiento del consumismo, surgió la necesidad de tostar café a mayor escala, lo que dio origen a los tostadores de café que conocemos en la actualidad. A lo largo de los últimos ciento cincuenta años, los tostadores de café han experimentado algunos avances, pero su forma básica se ha mantenido relativamente constante [5]. En la figura 2.1, se muestra una representación general de un tostador de café utilizado por el gremio de cafeteros en la ciudad de Mira que consta de una fuente de calor (quemador), una cámara de tostado y un enfriador.

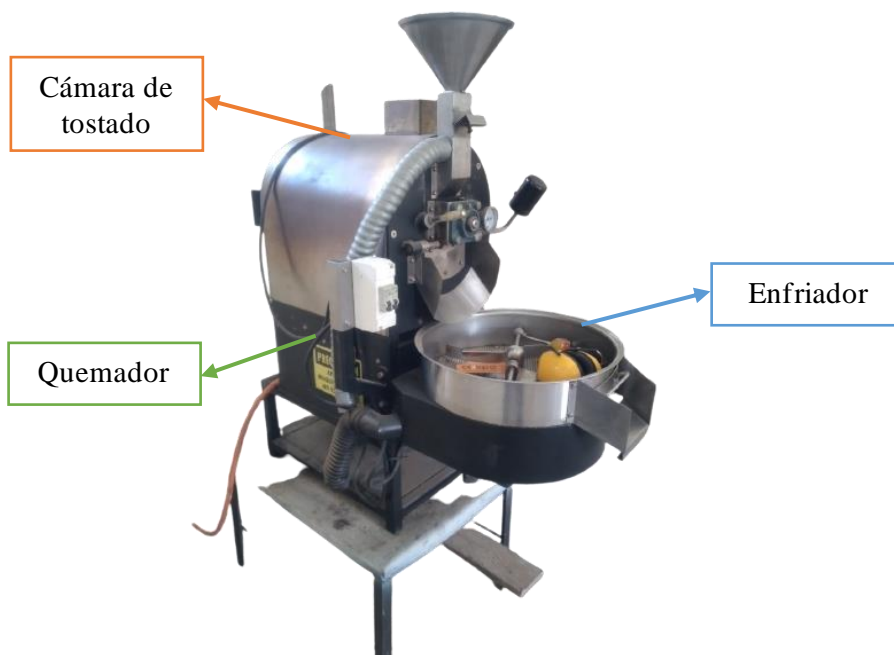


Figura 2.1. Partes de una tostadora de café.

En el contexto actual, con una amplia variedad de opciones disponibles en el mercado, la selección del equipo de tueste más adecuado puede representar un desafío. Es fundamental encontrar una solución que se ajuste de manera óptima al tamaño y la estructura específica de su negocio, permitiendo la producción de un producto final del que se pueda sentir pleno orgullo. Además, se recomienda consultar a expertos o profesionales en la industria del café para obtener asesoramiento especializado y revisar las reseñas y testimonios de otros usuarios del equipo considerado [6].

2.2.1.1. Gas Licuado de Petróleo

El Gas Licuado del Petróleo (GLP) es una mezcla de dos hidrocarburos principales, el butano y el propano, junto con otros hidrocarburos en menor proporción. Se obtiene durante el proceso de refinación del petróleo o como subproducto del proceso de separación del gas natural o crudo en los pozos de extracción. Este combustible tiene diversos usos, como en hogares para calefacción, cocina y agua caliente, así como en la industria y en vehículos que utilizan sistemas de GLP como combustible alternativo al petróleo. Debido a su versatilidad y facilidad de manejo, el GLP es una fuente importante de energía en muchas partes del mundo [7].



Figura 2.2. Envases de Gas Licuado de Petróleo [8].

2.2.2. Válvulas

Las válvulas son dispositivos mecánicos fundamentales en la regulación del flujo, tanto de líquidos como de gases, y desempeñan un papel crucial en diversas aplicaciones industriales y sistemas en general. Su función principal es controlar el caudal del fluido y, al hacerlo, permiten regular y ajustar las condiciones internas de presión de los depósitos o sistemas en los que se utilizan. Las válvulas pueden tener diferentes diseños y configuraciones, pero todas comparten la característica de poder abrirse o cerrarse para permitir o bloquear el flujo del fluido en un conducto o tubería. Algunas válvulas se accionan manualmente, mientras que otras son automáticas y pueden ser controladas por sistemas electrónicos o neumáticos [9].



Figura 2.3 Válvula reguladora industrial sanper [10].

Estas son algunas de las aplicaciones comunes de las válvulas:

- Control de flujo en sistemas de transporte de líquidos o gases.

- Regulación del flujo en sistemas de calefacción y refrigeración.
- Control de caudal en sistemas hidráulicos y neumáticos.
- Uso en sistemas de riego agrícola para controlar el flujo de agua.
- Regulación de presión en tanques y recipientes de almacenamiento.
- Uso en sistemas de control y automatización industrial.
- Aplicaciones en la industria química y petroquímica.

La elección adecuada de la válvula depende de la aplicación específica y de las condiciones del sistema en el que se utilizará. El correcto diseño, instalación y mantenimiento de las válvulas son aspectos importantes para asegurar el funcionamiento óptimo del sistema en el que se integran [9].

2.2.3. Automatización industrial

La automatización y supervisión industriales han revolucionado la manera en que se llevan a cabo los procesos productivos y de control de calidad en diversas industrias. Al utilizar sistemas automatizados y monitoreo constante, es posible lograr una mayor eficiencia, precisión y reducción de errores en comparación con los métodos manuales tradicionales [11].

Algunos de los beneficios clave de la automatización y supervisión industriales son:

- Control de calidad al 100%: La automatización permite llevar a cabo inspecciones y pruebas de calidad de manera continua y consistente en cada producto que se produce. Esto garantiza que todos los artículos cumplan con los estándares de calidad establecidos, minimizando la presencia de productos defectuosos o con problemas de fabricación [12].
- Reducción de errores humanos: Los errores causados por factores humanos, como el cansancio, la falta de concentración o la subjetividad, pueden minimizarse con la automatización. Las máquinas pueden llevar a cabo tareas repetitivas y precisas sin fatigarse y sin verse afectadas por factores emocionales [12].
- Mayor velocidad y eficiencia: Los sistemas automatizados pueden trabajar a velocidades constantes y más rápidas que los operadores humanos, lo que aumenta la productividad y reduce los tiempos de producción [12].

- Menor tiempo de inactividad: La supervisión constante y la capacidad de las máquinas para detectar problemas y notificarlos de manera inmediata permiten una respuesta más rápida ante cualquier incidencia o necesidad de mantenimiento. Esto reduce el tiempo de inactividad de las operaciones y mejora la disponibilidad de la planta [12].
- Optimización de recursos: La automatización puede ayudar a optimizar el uso de recursos como energía, materias primas y mano de obra, lo que se traduce en una reducción de costos de producción [12].
- Seguridad laboral: Al reemplazar tareas peligrosas o difíciles para los trabajadores por automatización, se disminuye el riesgo de accidentes y lesiones en el entorno de trabajo [12].

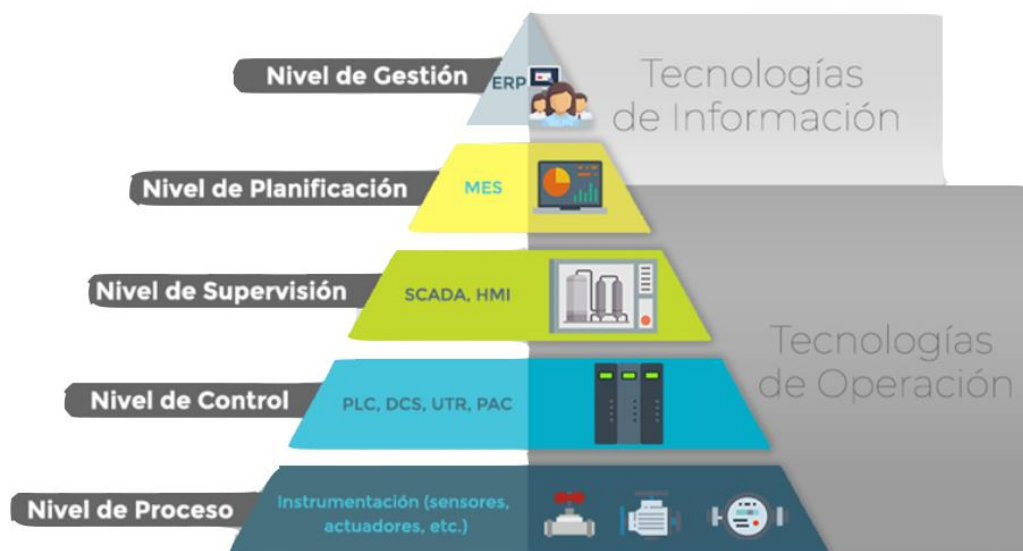


Figura 2.4 Pirámide de automatización [13].

2.2.4. Algoritmo de control PID

El controlador PID es ampliamente reconocido como el algoritmo de control más empleado en diversas industrias. La gran mayoría de los sistemas de retroalimentación cuentan con este algoritmo o variaciones ligeramente modificadas del mismo como su método de control. Su implementación puede llevarse a cabo de múltiples formas, incluyendo su uso como controlador independiente, como componente de un paquete de Control Digital Directo (CDD), o como parte de un sistema de control de proceso distribuido con estructura jerárquica [14].

Muchos ingenieros especializados en control e instrumentación de todo el mundo utilizan ampliamente los controladores PID en su trabajo diario, ya que han demostrado su eficacia y

aplicabilidad en numerosos escenarios prácticos. Estos controladores proporcionan un control adecuado y conveniente en la mayoría de los casos. El algoritmo PID, que se utiliza en los controladores PID, es un enfoque que puede ser abordado desde múltiples perspectivas. Por un lado, se puede operar utilizando reglas generales que guían el comportamiento del controlador. Estas reglas permiten ajustar las constantes del controlador y configurar su funcionamiento de acuerdo con las características específicas del sistema a controlar. Por otro lado, el algoritmo PID también puede ser tratado de manera analítica. Esto implica realizar un análisis matemático y teórico profundo para comprender el comportamiento del controlador en diferentes situaciones y establecer relaciones más precisas entre las entradas y salidas del sistema [15].

2.2.5. Estructura del controlador PID

En el marco del controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo), cada constante representa una ganancia específica que se aplica a las distintas componentes de la ecuación del controlador. Estas constantes son conocidas con el término proporcional (K_p), el término integral (K_i) y el término derivativo (K_d) [16].

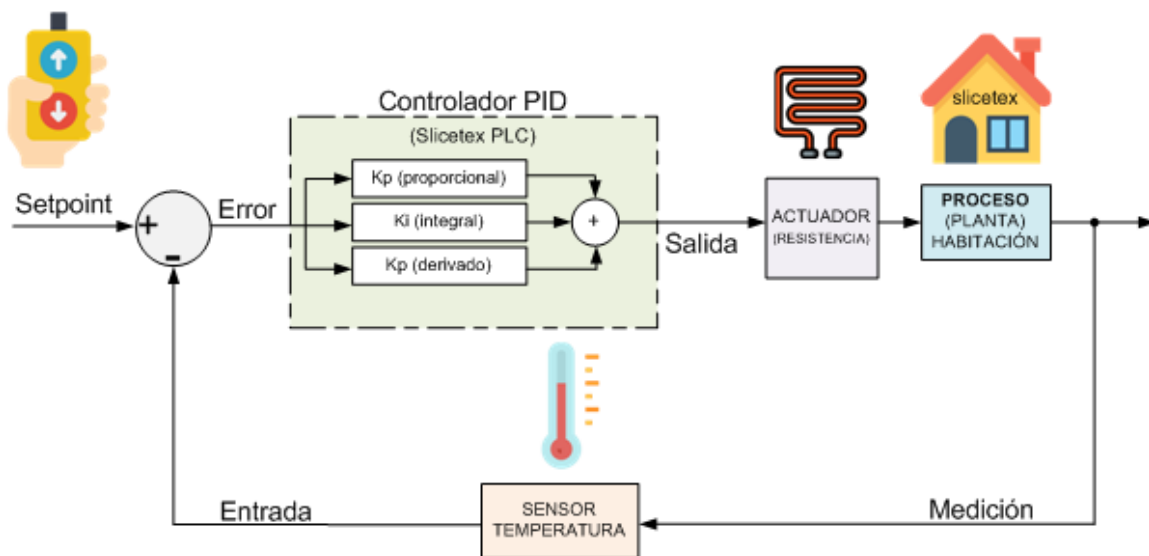


Figura 2.5. Sistema de control utilizando un controlador PID [16].

El proceso de determinar los valores adecuados para estas constantes es una tarea crucial, ya que influirán en el desempeño y la estabilidad del sistema controlado. La selección óptima de estas constantes es particular para cada sistema que se pretende controlar y no hay un conjunto universal de valores que funcione para todos los casos. Para obtener los valores óptimos de las constantes, es común utilizar una combinación de métodos, como ensayo y error, y la aplicación de reglas de ajuste clásicas específicas para controladores PID. En el método de

ensayo y error, se prueban diferentes valores de las constantes y se observa el comportamiento del sistema en respuesta a cambios de referencia o perturbaciones. A través de la experimentación, se busca ajustar las constantes para lograr el mejor rendimiento y estabilidad del sistema [16].

2.2.5.1. Acción Proporcional

La acción proporcional, en el ámbito del control de sistemas, se caracteriza por generar una señal de control que es proporcional al error presente en el sistema en un momento dado. Específicamente, esta acción proporciona una respuesta rápida al error de control, lo que resulta altamente ventajoso para mejorar la respuesta general de un sistema que se encuentra en un estado estable [17].

2.2.5.2. Acción Integral

La acción integral es un medio para eliminar errores de estado estable sin necesidad de reinicio manual. A veces se le llama reinicio automático. La razón principal del control integral es reducir o eliminar los errores de estado estable, pero a expensas de una peor respuesta transitoria. El control integral se puede usar solo o en combinación con otros modos de control. El control Proporcional + Integral (PI) es el modo más común [17].

2.2.5.3. Acción Derivativa

La acción derivada actúa sobre la tasa de cambio del error de control. Esto proporciona una respuesta rápida, a diferencia de la acción integral, producirá grandes señales de control en respuesta a errores de control de alta frecuencia, como cambios en el punto de ajuste (comando de paso) y ruido de medición [17].

2.2.6. Reglas de ajuste clásicas para controladores PID

Es fundamental adquirir conocimiento acerca de métodos de diseño que sean de naturaleza sencilla y no requieran el uso de matemática compleja. Estas técnicas de diseño se basan en procedimientos simples que se derivan de la experiencia y conocimiento del operador de sistemas de control. Con tan solo algunas mediciones y la aplicación de fórmulas sencillas, es posible obtener la respuesta del proceso real [18].

A continuación, se hablará de los diferentes métodos de ajuste para controladores PID:

2.2.6.1. Por asignación de polos

El método clásico de asignación de polos se utiliza para estabilizar el sistema o para mejorar la respuesta transitoria. Este método encuentra una matriz de control de retroalimentación de estado que asigna los polos del sistema de circuito cerrado a las ubicaciones deseadas especificadas por el usuario. Sin embargo, este método no es tan apropiado para eliminar el error de estado estable en los problemas de diseño del seguimiento del punto de referencia asignado [19].

2.2.6.2. Por cancelación de polos

Cuando un sistema de lazo abierto tiene polos en el semiplano derecho (en cuyo caso el sistema es inestable), una idea para aliviar el problema es agregar ceros en las mismas ubicaciones que los polos inestables, para cancelar los polos inestables. Desafortunadamente, este método es poco confiable. El problema es que cuando un cero agregado no cancela exactamente el polo inestable correspondiente, una parte del lugar geométrico de las raíces quedará atrapada en el semiplano derecho. Esto hace que la respuesta de bucle cerrado sea inestable [20].

2.2.6.3. Por Ziegler-Nichols

Los métodos de Ziegler-Nichols son uno de los más conocidos, propusieron una serie de reglas sencillas y rápidas para determinar los valores de ganancia proporcional K_p , basándose en las respuestas transitorias de una planta. Estos son muy utilizados cuando se desconocen los modelos matemáticos de la misma. Existen dos métodos dados por Ziegler y Nichols que son de lazo abierto y lazo cerrado [21].

- **Método 1: Lazo Abierto**

El primer método de bucle abierto es conveniente para procesos sobreamortiguados con retraso, es decir, procesos con una respuesta ante un escalón unitario, siendo que la respuesta de la planta se puede conseguir de manera experimental o a partir de una simulación dinámica obteniendo así una curva con forma de S [22], tal y como se muestra en la figura 2.6.

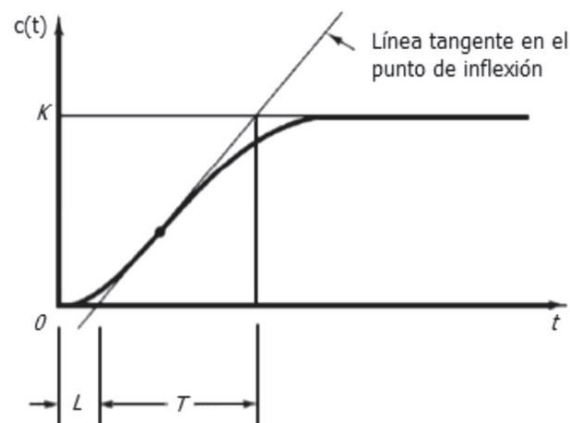


Figura 2.6. Curva de respuesta en forma de S [22].

De la curva S se obtiene dos parámetros característicos: L que es el tiempo de retardo y T que es la constante de tiempo. Conocidos estos dos parámetros, para alcanzar la sintonía se requiere ajustar los parámetros del regulador PID [23] según la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Regla de sintonía de Ziegler Nichols basada en la respuesta del primer método [23].

Regulador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$\frac{0.9T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$\frac{1.2T}{L}$	$2L$	$0.5L$

- **Método 2: Lazo Cerrado**

El segundo método de bucle cerrado es conveniente para procesos que se inestabilizan a partir de una ganancia del regulador proporcional, teniendo como desventaja que se debe llevar el proceso al límite de la estabilidad, lo que no siempre es seguro y conveniente [22].

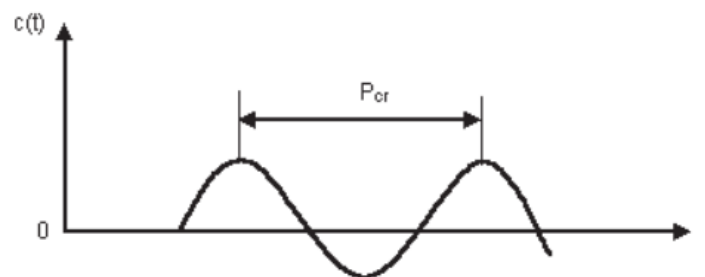


Figura 2.7. Oscilación sostenida con periodo P_{cr} [22].

Para establecer los parámetros de PID, al igual que en el lazo abierto, se requieren ajustarlos de acuerdo a lo que se muestra en Tabla 2.2., encontrando así K_p , T_i y T_d .

Tabla 2.2. Regla de sintonía de Ziegler Nichols basada en la respuesta del segundo método [23].

Regulador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$\frac{0.9T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$\frac{1.2T}{L}$	$2L$	$0.5L$

2.2.7. Sensores de Temperatura

Los sensores de temperatura, como su propio nombre lo dicen, nos permiten conocer la temperatura del entorno en el que se encuentra el sensor. Existen distintos tipos de escalas de medición como son la centígrada o grados Celsius, la Fahrenheit y la Kelvin [24]. Para este trabajo de grado nos centraremos en detectar la temperatura mediante la escala centígrada.

2.2.8. Tipos de sensores de temperatura

Existen muchos tipos de sensores de temperatura con los que el ingeniero puede trabajar. Conociendo los tipos de sensores que hay, ayudará a saber cuál es el más apropiado a la hora de instalar en un sistema automático. Los sensores más comunes son los siguientes:

2.2.8.1. Dispositivos resistivos (RTD y termistores)

Los dispositivos resistivos son dispositivos que cambian su resistencia con respecto a la temperatura. Tenemos dos tipos de sensores que son los dispositivos metálicos o más conocidos como RTD, y los termistores [25].

Los RTD basan su cambio de resistencia en un metal con respecto a la temperatura y se lo hace de forma lineal. El RTD más conocido es el PT100 que está constituido por un devanado de hilo encapsulado cuya resistencia nominal es de 100Ω a 0°C [26].

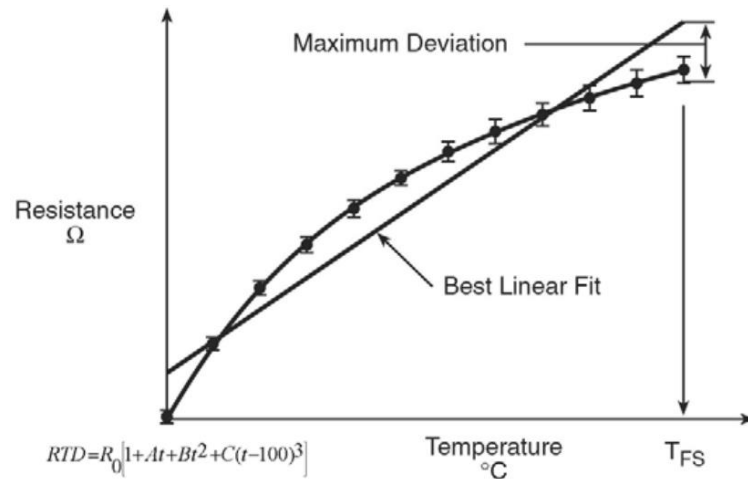


Figura 2.8. Curva de calibración típica de un RTD [26].

Los termistores confían en el cambio de resistencia en un semiconductor de cerámica en forma no lineal, Para medir el valor de la resistencia podemos hacer uso de un multímetro, así como si fuese cualquier otra resistencia, y este valor de temperatura variará dependiendo del sitio en donde estemos. Al incrementar la temperatura disminuirá la resistencia [25].

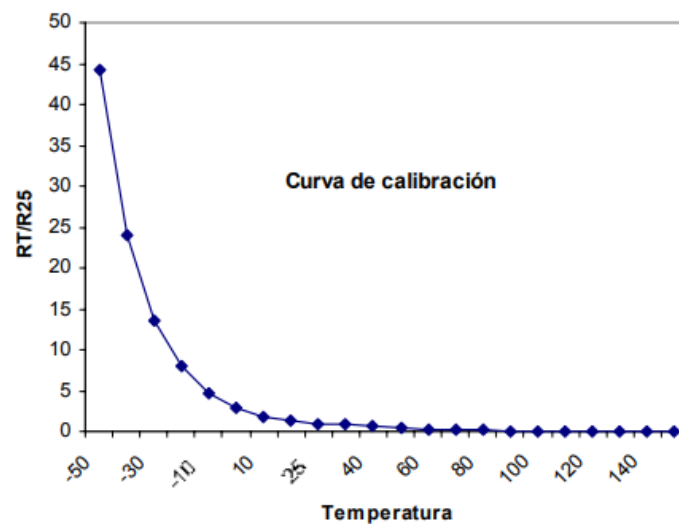


Figura 2.9. Curva de calibración típica de un termistor [26].

2.2.8.2. Dispositivos Bimetálicos

Los dispositivos bimetálicos son sistemas que utilizan un principio termomecánico basado en la diferencia de coeficientes de expansión térmica entre dos láminas de metales distintos, generalmente bronce y acero. Estas láminas están dispuestas en conjunto y se emplean para la adquisición de datos de temperatura. Cuando el dispositivo bimetálico se expone a cambios de temperatura, la lámina de bronce, que tiene un coeficiente de expansión térmica mayor, se expande, mientras que la lámina de acero, con un coeficiente de expansión térmica menor, se

contrae. Esta diferencia en la dilatación y contracción de las láminas provoca una curvatura en el conjunto bimetálico. Estos dispositivos bimetálicos son utilizados para aplicaciones de control de temperatura, en los cuales se pueden encontrar dos tipos principales, los termostatos y los termómetros [27].

2.2.8.3. Termopar

Los termopares son dispositivos utilizados para medir la temperatura en diferentes entornos y aplicaciones. Estos sensores convierten la diferencia de temperatura en una señal eléctrica que se puede interpretar y visualizar numéricamente. Existen diversos tipos de sensores de temperatura, cada uno con sus características y usos específicos [28]. Algunos de los sensores más conocidos y empleados son:

- **Termopar tipo J:**

El termopar tipo J es un transductor de temperatura que se construye mediante la combinación de dos materiales diferentes: Hierro y Constantan (una aleación de Cobre-Níquel). Este dispositivo se caracteriza por tener un rango de medición amplio, abarcando desde 0°C hasta 760°C, y su costo es relativamente bajo en comparación con otros sensores de temperatura disponibles en el mercado. Por esta razón, los termopares tipo J son ampliamente utilizados en la industria para una diversidad de aplicaciones. El espectro de medida versátil del termopar tipo J lo convierte en una opción funcional en múltiples escenarios industriales. Es común su empleo en procesos de inyección de plástico, en el ámbito de la ingeniería, en la validación de sistemas de cimentación de carreteras, entre otras aplicaciones. La versatilidad y eficiencia del termopar tipo J lo hacen adecuado para una amplia variedad de proyectos industriales y aplicaciones de control de temperatura [28].



Figura 2.10. Termopar tipo J de uso común [29].

- **Termopar tipo K:**

El termopar tipo K es un transductor de temperatura que se conforma mediante la combinación de dos aleaciones distintas: Níquel-Cromo y Níquel-Alumel. Este termopar se destaca por ser el amplio rango de operación, que abarca desde aproximadamente -200°C hasta 1.200°C , lo posiciona como una opción versátil y versada en una gran variedad de campos industriales y de investigación. Una de las principales ventajas del termopar tipo K es su alta proporción de Níquel en su composición, lo que le otorga una sobresaliente resistencia a la corrosión. Esta propiedad lo convierte en una elección recomendada en numerosos entornos donde las condiciones corrosivas o ambientes con alta humedad están presentes [28].



Figura 2.11. Termopar tipo K con vástago [29].

2.2.9. Protocolos de comunicación

Un protocolo de comunicaciones se refiere a un conjunto de reglas y estándares que permiten que dos o más dispositivos, se comuniquen entre sí para transmitir información mediante la variación de una magnitud física. Estos protocolos aseguran que los datos se transmitan y reciban de manera ordenada y que ambas partes involucradas comprendan la información compartida. Los protocolos de comunicaciones pueden implementarse mediante hardware y software, o una combinación de ambos. Por hardware, los protocolos pueden estar incorporados en circuitos electrónicos y componentes de red. Mientras que, por software, se utilizan bibliotecas y módulos de programación para facilitar la comunicación y el procesamiento de datos [30].

2.2.9.1. Protocolo de comunicación SPI

El bus de interfaz de periféricos serie, también conocido como bus SPI (Serial Peripheral Interface), es un estándar de comunicaciones utilizado principalmente para la transferencia de información entre circuitos integrados en equipos electrónicos. Este protocolo se utiliza para controlar una amplia variedad de dispositivos electrónicos digitales que aceptan una

transmisión de bits en serie, sincronizada por un reloj. Funciona como un sistema full-duplex, lo que significa que la comunicación puede ocurrir en ambas direcciones simultáneamente. El bus SPI opera bajo un paradigma maestro-esclavo, donde un dispositivo maestro (como un microcontrolador) inicia y controla las comunicaciones con uno o más dispositivos esclavos (como sensores, pantallas, memorias, etc.) [30].

2.2.9.2. Protocolo de comunicación I2C

I2C es un acrónimo que corresponde a "Inter-Integrated Circuit", conocido como Bus Inter-IC en español. Este bus de comunicación I2C fue desarrollado por Phillips Semiconductors en los años ochenta con el propósito original de proporcionar una forma sencilla de conectar la Unidad Central de Procesamiento (CPU) con los chips periféricos en dispositivos como televisores y otros sistemas de complejidad media-alta. Desde entonces, el bus I2C ha ganado amplia aceptación en la industria y se ha convertido en un estándar de facto. Su diseño y simplicidad lo han convertido en una opción popular para la comunicación entre diferentes componentes de un sistema electrónico. El bus I2C se caracteriza por su arquitectura maestro-esclavo, donde un dispositivo maestro inicia y controla la comunicación con uno o varios dispositivos esclavos [31].

2.2.10. Servomotores

Un servomotor es un actuador electromecánico que ofrece la capacidad de controlar la posición precisa del eje en un instante dado. Su diseño está orientado a moverse hasta una cantidad específica de grados y mantenerse estable en dicha posición. Un servomotor es un sistema integrado por componentes tanto electromecánicos como electrónicos [32]. La Figura 2.12 presenta un ejemplo ilustrativo de este dispositivo.

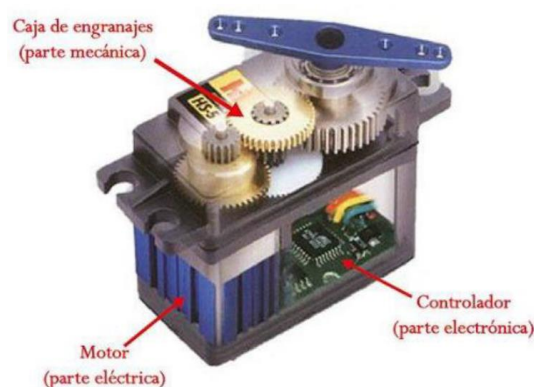


Figura 2.12. Imagen de un servomotor [32].

Entre las características clave de un servomotor se encuentran el par y la velocidad, los cuales se describen a continuación:

- **Par:** El par, también conocido como momento de torsión, se refiere a la fuerza de giro que el servomotor puede aplicar para mover el eje o la carga acoplada a él. Es una medida de la capacidad de realizar tareas de torque específicas, como levantar objetos o realizar movimientos mecánicos [32].
- **Velocidad:** La velocidad de un servomotor hace referencia a la rapidez con la que puede rotar el eje o moverse entre diferentes posiciones angulares. Esta característica es crucial para aplicaciones que demandan movimientos rápidos y precisos [32].

2.2.11. Modulación por ancho de pulso para control de servomotores

Los Servomotores son dispositivos que se caracterizan por tener un amplio rango de movimiento, que generalmente va desde 0 hasta 180 grados, aunque en ciertos casos puede alcanzar los 210 grados. Para lograr el control de este tipo de movimiento, los Servomotores utilizan comúnmente la técnica de Modulación por Ancho de Pulso (PWM), también conocida como Pulse Width Modulation en inglés. La señal PWM es la que permite enviar órdenes al eje del Servomotor, determinando así su orientación y posición. Esta señal consiste principalmente en un pulso que se repite a intervalos regulares. La duración del pulso es lo que le indica al motor la dirección y el ángulo en el que debe moverse [33].

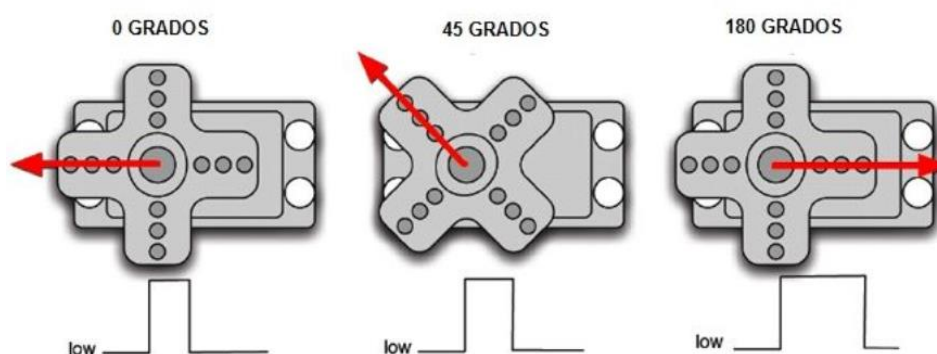


Figura 2.13. Giro del servomotor [34].

En particular, una señal PWM con pulsos de 1.5 milisegundos indicará al motor que tome la posición central de 90 grados. Si la duración del pulso es menor a 1.5 milisegundos, el motor interpretará que debe moverse hacia la posición de 0 grados. Por otro lado, si la duración del pulso es mayor a 1.5 milisegundos, el motor se dirigirá hacia la posición de 180 grados [33].

2.2.12. Arduino Nano

2.2.12.1. Hardware

El Arduino Nano es una placa de desarrollo que integra el microcontrolador Atmega328P operando a una frecuencia de 16MHz y un voltaje de alimentación de 5V. Esta placa proporciona un número equivalente de pines de entradas y salidas digitales y analógicas en comparación con la placa de Arduino UNO, lo que garantiza una funcionalidad similar entre ambas. Una de las características distintivas del Arduino Nano es su tamaño reducido, lo que lo hace más compacto y adecuado para aplicaciones donde el espacio es limitado. A pesar de su tamaño compacto, mantiene la misma funcionalidad que la placa Arduino UNO [35].

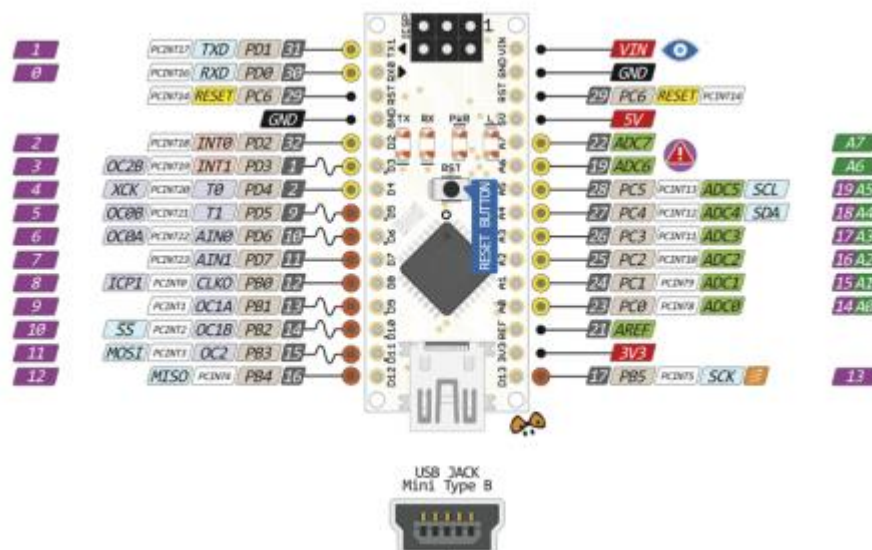


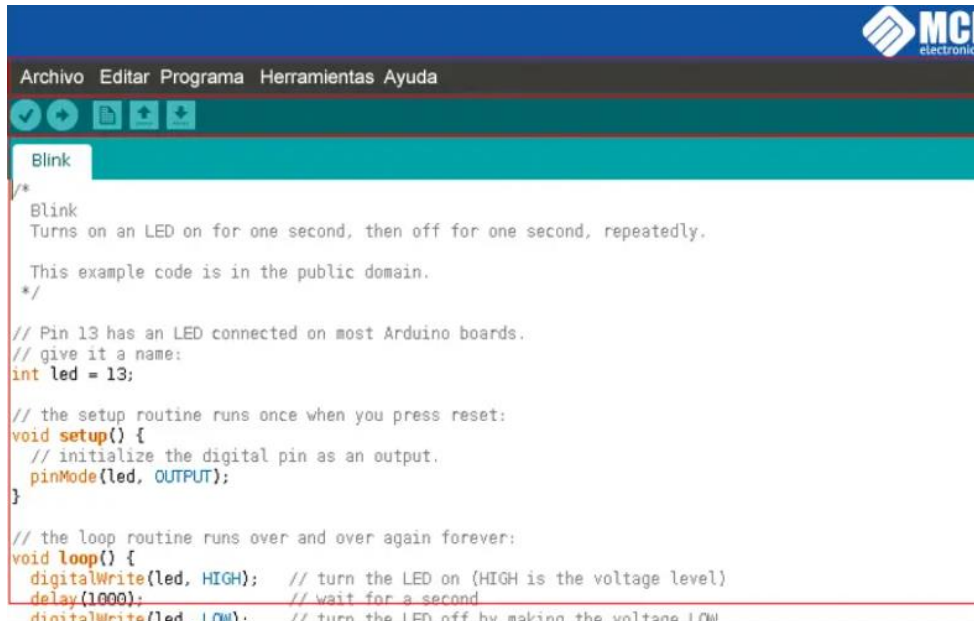
Figura 2.14. Estructura interna de la placa Arduino Nano [36].

Además, el Arduino Nano incorpora un conector USB mini-B en lugar del conector USB tipo B que se utiliza comúnmente en la placa Arduino UNO. Este conector USB mini-B facilita la conexión con dispositivos externos y brinda una solución práctica para la programación y comunicación con el microcontrolador [35].

2.2.12.2. Software

Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) proporciona las herramientas necesarias para cargar el programa ya compilado en la memoria flash del hardware, permitiendo la programación de microcontroladores y placas Arduino de manera sencilla y eficiente. Gracias

a esta integración de herramientas en un solo entorno, los desarrolladores pueden trabajar de manera más organizada y efectiva en la creación y depuración de sus proyectos [37].

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. At the top, there is a blue header bar with the MCI electronics logo on the right. Below the header is a menu bar with the items 'Archivo', 'Editar', 'Programa', 'Herramientas', and 'Ayuda'. Underneath the menu bar is a toolbar with several icons. The main area of the IDE is a text editor displaying the 'Blink' example code. The code is as follows:

```
Blink
/*
  Blink
  Turns on an LED on for one second, then off for one second, repeatedly.

  This example code is in the public domain.
  */

// Pin 13 has an LED connected on most Arduino boards.
// give it a name:
int led = 13;

// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize the digital pin as an output.
  pinMode(led, OUTPUT);
}

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  digitalWrite(led, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000);             // wait for a second
  digitalWrite(led, LOW);  // turn the LED off by making the voltage LOW
```

Figura 2.15. Entorno de programación Arduino IDE [37].

El área de trabajo del entorno de desarrollo puede ser segmentada en cinco principales secciones, de arriba hacia abajo: la barra de menús, la barra de botones, el editor de código, la barra de consola de mensajes y la barra de estado [37].

Capítulo III

Marco Metodológico

Este capítulo tiene como objetivo exponer detalladamente la metodología empleada en el proceso de desarrollo de este estudio. La metodología utilizada se fundamenta en un enfoque sistemático y riguroso, que garantiza una planificación y ejecución efectivas del proyecto. A través de una serie de etapas bien estructuradas, se ha logrado abordar cada aspecto clave del sistema de control, considerando tanto los requerimientos técnicos como los objetivos del estudio.

3.1. Modelo de la investigación

Para el desarrollo de este trabajo de grado, se ha adoptado un enfoque basado en la investigación aplicada, el cual se centra en la resolución de problemas específicos mediante la proposición de soluciones. Asimismo, se ha empleado una metodología de investigación documental, la cual involucra la recopilación de información proveniente de artículos científicos, libros y catálogos comerciales relevantes al tema de estudio. Además, se ha utilizado la investigación científica como un componente fundamental en la elaboración del documento, asegurando una base sólida y confiable para la presentación de conceptos, metodologías y resultados obtenidos en el trabajo realizado [38]. Esta investigación científica ha sido una fuente valiosa para sustentar y respaldar cada uno de los hallazgos y conclusiones presentados en el trabajo.

3.2. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación se organiza en fases con el objetivo de lograr el desarrollo completo de un sistema de control de temperatura para una máquina tostadora de café que funciona con gas licuado de petróleo. Estas fases han sido estructuradas para alcanzar los objetivos establecidos y satisfacer las necesidades específicas del propietario de la máquina. Cada fase del diseño ha sido cuidadosamente planificada para abordar aspectos clave del proyecto y asegurar un progreso ordenado y efectivo en la implementación del sistema de control de temperatura. Estas fases proporcionan una estructura clara y lógica para la investigación y permiten una gestión eficiente de los recursos y el tiempo.

- **Fase 1: Investigación.**

En esta etapa, se lleva a cabo una investigación exhaustiva con el objetivo de definir las características fundamentales de un sistema de medición de temperatura. Se realiza una búsqueda y recopilación de información proveniente de diversas fuentes, tales como artículos científicos, literatura técnica, normas y especificaciones relevantes al campo de la medición de temperatura.

Actividad 1: “Análisis de los parámetros en el proceso del tostado del café”.

En esta actividad, se procedió a identificar y analizar exhaustivamente los parámetros existentes en el proceso de tostado de café en las máquinas de torrefacción. Se llevaron a cabo estudios y observaciones detalladas sobre los factores que influyen en el proceso de tostado, como la temperatura, tiempo, flujo de aire, humedad, entre otros.

Actividad 2: “Definición de los parámetros del tostado del café”.

En esta etapa, se realizó una revisión bibliográfica para obtener información precisa y actualizada sobre los parámetros del tostado de café previamente identificados. Se recopilaron datos relevantes provenientes de artículos científicos, libros y fuentes especializadas que permitieron establecer de manera clara y precisa los parámetros a considerar en el proceso de control.

Actividad 3: “Análisis del sistema de control de las máquinas tostadoras de café”.

En esta actividad, se llevó a cabo un análisis general de los sistemas de control ya existentes y disponibles en el mercado para las tostadoras de café. Se evaluaron las características y

funcionalidades de estos sistemas, así como su adecuación a las necesidades específicas del proceso de tostado.

Actividad 4: “Análisis de la máquina existente a implementar el sistema de control”.

En esta fase, se realizó un estudio detallado de la máquina en la cual se implementará el sistema de control. Se identificaron los componentes y dispositivos presentes en la máquina, así como las interfaces disponibles para la incorporación del nuevo sistema de control.

Actividad 5: “Socializar con los propietarios sobre los parámetros a utilizar”.

En esta etapa, se llevaron a cabo reuniones y comunicaciones con el propietario de la máquina para compartir y discutir los parámetros definidos para el control del tostado de café. Se presentaron las propuestas y se recopilaron las opiniones y sugerencias de los propietarios para asegurar que los parámetros se ajusten a sus necesidades y expectativas.

- **Fase 2: Análisis del problema.**

En esta fase, se realiza un análisis minucioso del problema identificado, evaluando sus implicaciones y consecuencias. Se procede a identificar posibles soluciones y se elige la opción más adecuada y factible para su posterior implementación.

Actividad 1: “Identificación de posibles soluciones al problema”.

Mediante un análisis detallado de la problemática, se proponen diversas soluciones pertinentes y viables para abordar el problema en cuestión. Cada opción es evaluada considerando su viabilidad técnica, eficacia y conveniencia.

Actividad 2: “Presentación de la propuesta a implementar”.

Tras evaluar las distintas soluciones, se selecciona la propuesta más adecuada que se ajusta y cumple con los requisitos y necesidades del propietario de la máquina. Esta elección se basa en criterios técnicos y prácticos.

Actividad 3: “Determinación de las características técnica de los materiales que se va a utilizar”.

Se procede a establecer las características técnicas de los dispositivos y materiales necesarios para la implementación del sistema de control de temperatura. Esto incluye sensores, actuadores, componentes electrónicos y otros elementos requeridos.

Actividad 4: “Determinación de costos de la propuesta”.

Se lleva a cabo una evaluación de los costos asociados a la adquisición de los dispositivos y materiales necesarios para la implementación de la solución propuesta. Se consideran las diferentes opciones de marcas y proveedores presentes en el mercado.

- **Fase 3: Construcción del prototipo del diseño.**

En esta etapa, se inicia la construcción del sistema de control de temperatura utilizando el software y los dispositivos previamente estudiados y seleccionados.

Actividad 1: “Diseñar un sistema de control”.

Mediante el uso de software especializado, se procedió a diseñar los circuitos necesarios para la implementación del sistema de control de temperatura. Se empleó lógica cableada para configurar la interconexión de los componentes de manera adecuada.

Actividad 2: “Desarrollo de un modelo de programación del control”.

La programación del sistema de control se llevó a cabo considerando el controlador utilizado en el circuito, junto con el software correspondiente. Se desarrolló el código necesario para permitir el funcionamiento del sistema de manera automática y controlada.

Actividad 3: “Implementar el sistema automático”.

En esta actividad, se procedió a la implementación física del sistema de control de temperatura. Se utilizó la sensórica seleccionada para medir la temperatura, y el actuador para controlar el mecanismo de control de la máquina tostadora. La programación previamente desarrollada fue cargada en el microcontrolador para permitir el funcionamiento automático del sistema.

Actividad 4: “Diseñar del sistema de medición de temperatura”.

Se llevó a cabo la implementación tanto del circuito electrónico como del programa en el microcontrolador. Esta fase permitió verificar el correcto funcionamiento del sistema y la interacción efectiva entre los distintos componentes.

- **Fase 4: Análisis de resultados.**

En esta fase, se llevan a cabo las pruebas de funcionamiento con el objetivo de detectar y corregir posibles errores en el sistema de control de temperatura implementado.

Actividad 1: “Pruebas de funcionamiento”.

Se realizaron pruebas exhaustivas del sistema de control de temperatura en la máquina tostadora de café, asegurándose de que cumpliera con los parámetros requeridos y las especificaciones previamente establecidas. Durante las pruebas, se verificó el correcto funcionamiento del sistema y su capacidad para mantener la temperatura dentro de los rangos deseados durante el proceso de tostado.

Actividad 3: “Análisis de los resultados”.

Se recopilaron datos durante las pruebas de funcionamiento para la realización de curvas y gráficos, lo que permitió analizar y evaluar el desempeño del sistema de control de temperatura. Estos datos fueron estudiados en detalle para detectar posibles desviaciones o anomalías en el comportamiento del sistema y, de ser necesario, realizar ajustes o correcciones para mejorar su rendimiento.

Capítulo IV

Implementación Y Resultados

En este capítulo abordaremos las especificaciones necesarias para la construcción e implementación del proyecto, desde la conexión de los dispositivos electrónicos con la placa de Arduino, la programación del sensor y actuador que fueron seleccionados previamente, la elaboración del gabinete de control y, por último, las pruebas de funcionamiento en la máquina tostadora de café.

4.1. Requerimientos

Los requerimientos que debe satisfacer el trabajo de grado son:

- Medición de la temperatura dentro del tambor de la máquina tostadora del café.
- Una fácil calibración del sensor a utilizar.
- Mostrar la adquisición de datos en una pantalla LCD.
- Fácil interacción entre usuario y máquina.
- Mantener los circuitos libres de corrosión para mayor tiempo de vida.
- Diseño del circuito electrónico en software de simulación.
- Colocar indicadores lumínicos para el encendido y apagado del control.
- El circuito debe evitar hacer cortos involuntarios y tenerlo bien ubicado dentro del gabinete de control.

4.2. Recursos disponibles

Para el desarrollo de este proyecto de grado se dispone de una máquina tostadora de café artesanal brindada por el señor Félix Méndez, quien es miembro del gremio de cafeteros del sector de Juan Montalvo del cantón Mira. La máquina tiene la flauta de gas extraíble la cual es propicia para manipularla fácilmente y a su vez poderle colocar el actuador en la llave. El cilindro de la máquina tostadora de café tiene una perforación pasante en el centro de su eje, con el cual se instalará el sensor con el que se hará la adquisición de datos. A continuación, se mostrará la máquina a implementar el control de temperatura:



Figura 4.1. Máquina tostadora de café usada en este proyecto.

4.3. Diagrama de bloques



Figura 4.2. Diagrama de bloques del sistema.

4.4. Matriz morfológica

Tabla 4.1. Matriz morfológica.

Componentes	Alternativas		
Medición de temperatura de máquina tostadora de café.	RTD (PT100)	Termocupla tipo K	Termocupla tipo J de 3mm
Tarjeta de procesamiento de datos.	Arduino Nano	PLC LOGO! 12/24	
Indicador local	Pantalla LCD 16x2	Pantalla LCD 20x4	Pantalla LCD 128x64

Solución A, línea azul: En esta alternativa, se ha elegido utilizar un RTD del tipo PT100, el cual proporcionará una lectura de datos en formato analógico. El procesamiento de estos datos se llevará a cabo mediante un PLC LOGO 12/24, que actuará como controlador del sistema. Como indicador local, se empleará una pantalla LCD de 128x64 píxeles, lo que permitirá mostrar una mayor cantidad de datos y líneas de campo para una proyección más completa de la información. El objetivo principal de esta solución es implementar un controlador PID que actúe sobre el actuador, en este caso, el servomotor Feetech 35kg.

Solución B, línea naranja: Para esta alternativa, se ha optado por utilizar una termocupla tipo K como sensor de temperatura, la cual estará conectada a un módulo MAX6675 para obtener una lectura precisa y confiable de los datos. Para el procesamiento y gestión de los datos obtenidos, se empleará una placa de Arduino Nano, ya que su bajo consumo de memoria la hace adecuada para esta aplicación. Como indicador local, se utilizará una pantalla LCD de 20x4, que proporcionará una visualización clara y suficiente para mostrar la información relevante del proceso de tostado sin requerir demasiadas líneas de campo. Al igual que en la

alternativa anterior, se implementará un controlador PID para actuar sobre el actuador, que en este caso será el servomotor.

Solución C, línea verde: Para la adquisición de datos en esta alternativa, se empleará una termocupla tipo J. Al ser parte de la familia de termopares, esta variante presenta la particularidad de ser adecuada para aplicaciones generales, no limitándose únicamente a usos alimentarios, como en el caso del café. Para el procesamiento de los datos provenientes de la termocupla tipo J y de la pantalla LCD de la LCD 16x2, se ha optado por utilizar la placa Arduino Nano debido a su consumo de memoria moderado, lo que la convierte en una opción eficiente para este escenario. Una vez obtenidos los datos del sensor, se implementará un controlador PID para activar el servomotor.

Para acceder a las especificaciones detalladas de los elementos mencionados en la matriz morfológica, se sugiere consultar los anexos B, D y F. En dichos anexos, se encuentran recopiladas todas las características técnicas y datos relevantes de cada elemento.

4.5. Selección de alternativa

Una vez obtenidas las tres diferentes soluciones, se procede a realizar una selección utilizando el método de criterios ponderados. Este método consiste en comparar las alternativas mediante tablas que reciben una ponderación de acuerdo con su conveniencia. Se asignarán valores numéricos a cada celda de la tabla de la siguiente manera:

- **1:** cuando el criterio de la fila es de mayor relevancia que el de la columna.
- **0.5:** cuando el criterio de la fila y columna tienen la misma importancia.
- **0:** cuando el criterio de la columna es de mayor relevancia que el de la fila.

Cada alternativa será valorada en función de los criterios establecidos, y se sumarán los valores de cada fila para cada uno de los criterios. De esta manera, se obtendrá un resultado numérico que permitirá identificar la alternativa más adecuada según los criterios establecidos y su ponderación.

En el proceso de ponderación de las alternativas para la implementación del sistema en la máquina tostadora de café, se han establecido criterios de priorización cuantitativos. A continuación, se describen los criterios utilizados y su importancia relativa:

- **Costo:** este criterio se refiere al valor económico asociado a los materiales requeridos para cada alternativa, así como a su disponibilidad rápida en el mercado. Un menor costo y mayor disponibilidad serán valorados positivamente, ya que contribuyen a la viabilidad económica del proyecto.
- **Vida útil:** este criterio evalúa la duración o vida útil que ofrece cada alternativa, considerando su adecuado mantenimiento. Una mayor vida útil será preferida, ya que garantiza una mayor durabilidad y rendimiento a largo plazo.
- **Fiabilidad de la medición:** este criterio se refiere a la precisión y confiabilidad de la adquisición de datos proporcionados por el sensor utilizado en cada alternativa. Una mayor fiabilidad de la medición será un factor importante, ya que asegura la exactitud en el control de temperatura durante el proceso de tostado.
- **Procesamiento de datos:** este criterio se enfoca en la capacidad de procesamiento de la tarjeta utilizada en el proyecto. Una mayor capacidad de procesamiento permitirá un control más eficiente y complejo del sistema, lo que puede ser crucial para alcanzar un alto rendimiento y funcionalidad.

4.5.1. Matriz de priorización para cada criterio.

Tabla 4.2. Matriz de priorización para cada criterio.

Criterio	Costo	Vida útil	Fiabilidad de la medición	Procesamiento de datos	$\sum+1$	Ponderación
Costo	-	0.5	0.5	0.5	2.5	0.25
Vida útil	0.5	-	0	0.5	2	0.20
Fiabilidad de la medición	0.5	1	-	1	3.5	0.35
Procesamiento de datos	0.5	0.5	0	-	2	0.20
				Suma:	10	1

En la tabla 4.2, los resultados indican que, según la valoración realizada para cada criterio, la fiabilidad de la medición es considerada la característica más relevante para la selección del

controlador de procesos. El costo también es un factor importante a considerar, seguido de cerca por la vida útil y el procesamiento de datos, que tienen una importancia similar en esta evaluación.

4.5.2. Matriz de priorización para el criterio de costo.

Tabla 4.3. Matriz de priorización para el criterio de costo.

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0.157
Solución B	1	-	1	3	0.5
Solución C	1	0	-	2	0.333
Suma:				6	1

En la tabla 4.3, que corresponde a la evaluación de las soluciones para el controlador de procesos en términos de costo, se ha determinado que la solución B obtuvo la mayor ponderación, lo que la convierte en la opción más idónea en este contexto. En comparación, las soluciones A y C tienen menor ponderación, lo que indica que tienen un costo superior en relación con la solución B.

4.5.3. Matriz de priorización para el criterio de vida útil.

Tabla 4.4. Matriz de priorización para el criterio de vida útil.

Vida Útil	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0.5
Solución B	0	-	0.5	1.5	0.25
Solución C	0	0.5	-	1.5	0.25
Suma:				6	1

En la tabla 4.4, referente a la evaluación de las soluciones para el controlador de procesos en términos de vida útil, se ha observado que la solución A ha obtenido la mayor ponderación, lo que la convierte en la opción más idónea en este escenario, en comparación con las soluciones B y C, que han obtenido una ponderación menor.

4.5.4. Matriz de priorización para el criterio de fiabilidad de medición.

Tabla 4.5. Matriz de priorización para el criterio de fiabilidad de medición.

Fiabilidad de medición	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0.157
Solución B	1	-	1	3	0.5
Solución C	1	0	-	2	0.333
			Suma:	6	1

En la tabla 4.5 sobre la evaluación de las soluciones para controlador de procesos con respecto a la fiabilidad de medición, se indica que la solución B obtuvo la mayor ponderación, siendo la más idónea en este caso, en relación a las soluciones A y C que tienen menor ponderación.

4.5.5. Matriz de priorización para el criterio de procesamiento de datos.

Tabla 4.6. Matriz de priorización para el criterio de procesamiento de datos.

Procesamiento de datos.	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0.5
Solución B	0	-	0.5	1.5	0.25
Solución C	0	0.5	-	1.5	0.25
			Suma:	6	1

En la tabla 4.6 sobre la evaluación de las soluciones para controlador de procesos con respecto al procesamiento de datos, se indica que la solución A obtuvo la mayor ponderación, siendo la más idónea en este caso, en relación a las soluciones B y C que tienen menor ponderación.

4.5.6. Selección de la mejor alternativa ponderada.

Tabla 4.7. Selección de la mejor alternativa ponderada.

Conclusiones	Costo	Vida útil	Fiabilidad de la medición	Procesamiento de datos	Σ	Prioridad
Solución A	0.02783	0.083	0.02783	0.083	0.22166	2
Solución B	0.083	0.0415	0.083	0.0415	0.249	1
Solución C	0.056	0.0415	0.056	0.0414	0,1949	3

Se ha tomado la decisión de escoger la alternativa B como indica en la tabla 4.7, para la implementación de una placa de Arduino Nano, con una termocupla tipo K y para su linealización haremos uso de un MAX6675 y siendo el indicador local una pantalla LCD 20x4-

4.6. Descripción de componentes

4.6.1. Arduino Nano

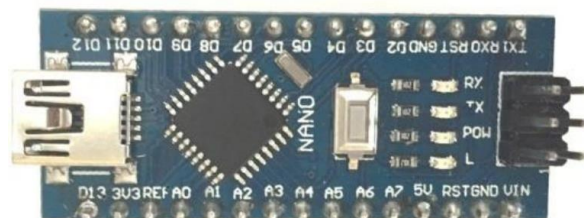


Figura 4.3. Placa Arduino Nano. [36]

Arduino Nano es un microcontrolador basado en el ATmega328P. Consta de 14 pines de e/s digital de los cuales 6 pueden ser usados como salidas PWM, y 6 entradas analógicas. Dispone de una unidad UART y un botón de Reset. En la tabla 4.8 se detalla las especificaciones técnicas del Arduino Nano.

Tabla 4.8. Especificaciones técnicas del Arduino Nano [36].

Microcontrolador	ATmega328P
Tensión de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (límite)	7-12V

Pines de E/S digitales	14 (6 salidas PWM)
Pines de entrada analógicas	6 (A0 – A5)
Corriente cc por pines de E/S	40 mA
Corriente cc para pin de 3.3V	50 mA
Memoria flash	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidad de reloj	16 MHz
Comunicación	IIC, SPI, USART

4.6.2. Sensor Termopar Tipo K



Figura 4.4. Termocupla tipo K [39].

El Termopar Tipo K es un sensor de temperatura basado en la tecnología termopar, que consiste en un conductor positivo fabricado con una aleación de níquel-cromo y un conductor negativo hecho de níquel-aluminio. Este tipo de termopar está disponible en diferentes calibraciones, que son adecuadas para aplicaciones de alta temperatura y pueden alcanzar un rendimiento máximo de hasta 2320 °C [39].

Tabla 4.9. Especificaciones técnicas de Termopar tipo K [39].

Clase	1
Precisión	+/-1.5°C
Rango de medición	0°C hasta 450°C
Cable positivo	Fabricado en Aleación Nickel/cromo
Cable negativo	Fabricado en Aleación Nickel/aluminio

Longitud total del cable	2 m
Conexión	Terminal en U aislada en vinilo

4.7. Conexión de sensores y actuadores a la placa

En esta sección, se elaboró el diagrama de conexión que representa la interconexión de los diversos elementos que serán implementados en la etapa de control del proyecto. Para la creación del diagrama, se utilizó un simulador de circuitos llamado Fritzing. En la Figura 4.5, se muestra de forma esquemática la disposición de las conexiones entre los componentes. El diagrama de conexión proporciona una representación visual clara y detallada de cómo los distintos elementos interactúan y se comunican entre sí en el sistema de control.

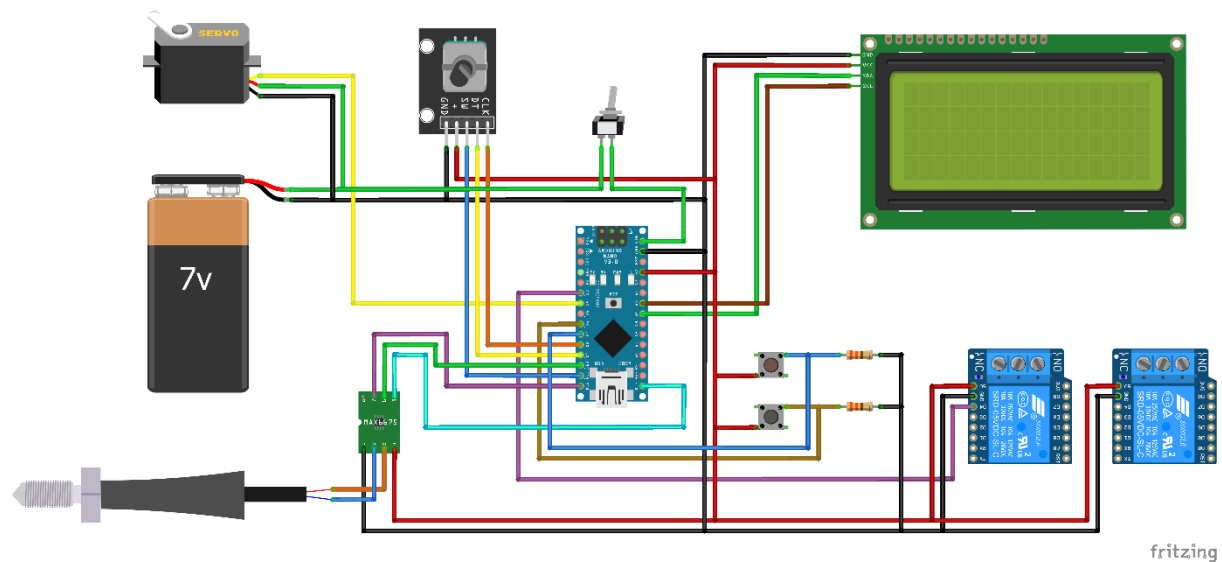


Figura 4.5. Diagrama de conexión del sistema de control del proyecto

4.8. Programación

Con el propósito de garantizar el correcto y eficiente desarrollo de la programación, se llevó a cabo la elaboración de un diagrama de flujo y pseudocódigo. Estos recursos fueron diseñados con el objetivo de explicar de manera detallada y secuencial los diferentes pasos que el programa ejecutará durante su funcionamiento.

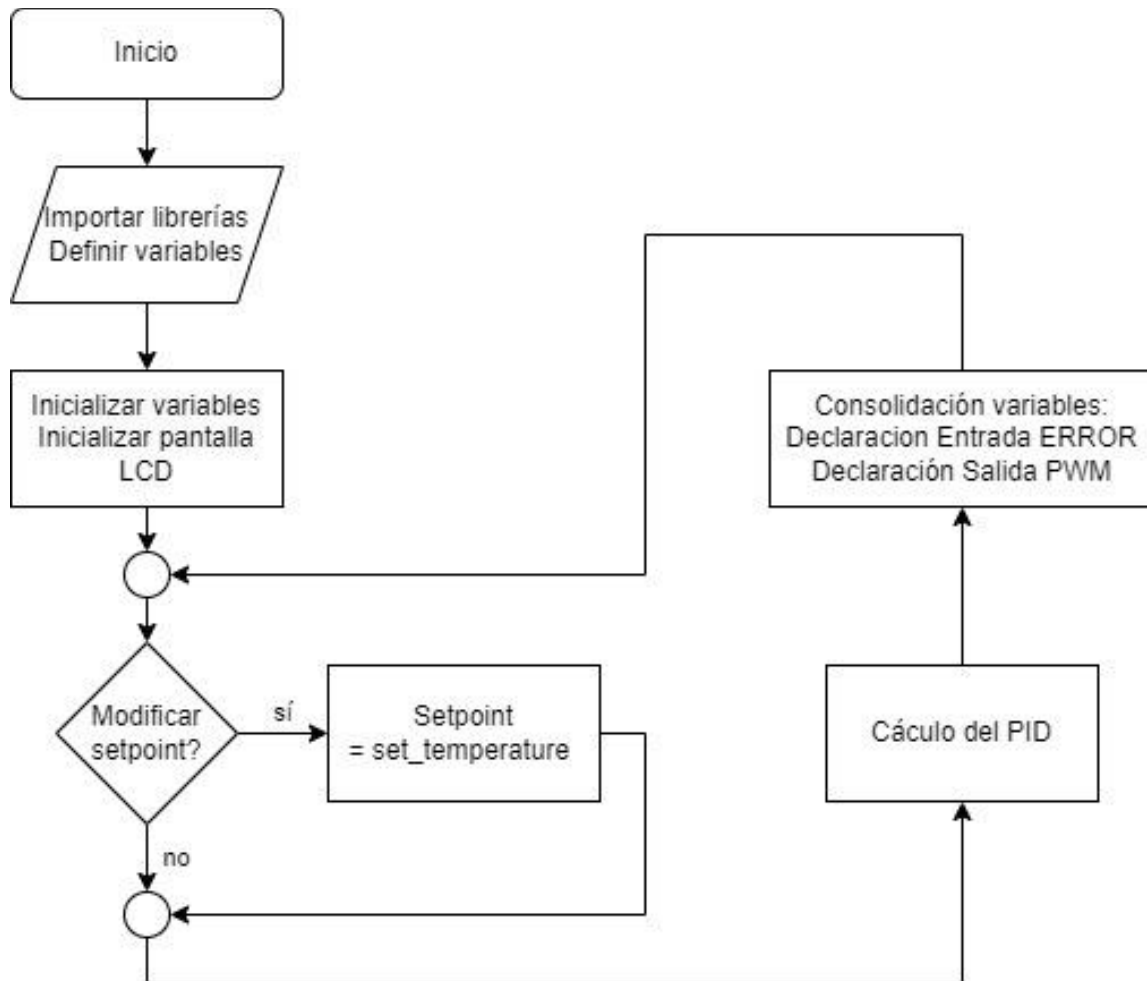


Figura 4.6. Diagrama de flujo

En la Figura 4.6, se presenta el diagrama de flujo, el cual provee una representación visual clara y estructurada de las acciones y decisiones que el programa tomará en su ejecución. El diagrama de flujo es una herramienta valiosa para facilitar la comprensión y análisis del proceso lógico del programa, permitiendo una mejor interacción con el equipo de desarrollo y posibilitando realizar ajustes o mejoras antes de avanzar a la fase de codificación.

4.9. Estructura de protecciones del sistema

En el proyecto, se llevó a cabo la implementación de una carcasa diseñada para albergar y proteger todo el circuito electrónico, que incluye el Arduino Nano, borneras, resistencias y otros componentes. Asimismo, se diseñó un cuadro para la pantalla LCD 20x4 y una base para el acople del servomotor con la válvula de gas. Estas medidas de protección tienen como objetivo prolongar la vida útil de los componentes, especialmente debido a que el ambiente en el que operan se caracteriza por altas temperaturas.

Tabla 4.10. Piezas de protección y acople.

Pieza	Cantidad
Base para el circuito electrónico	1
Cuadro para pantalla lcd	1
Base para acople del servomotor con válvula de gas	1

4.9.1. Base para el circuito electrónico

La base, es donde se alojará la tarjeta electrónica, tiene extensiones en cada una de las esquinas para sujetar la carcasa al doble fondo del gabinete.

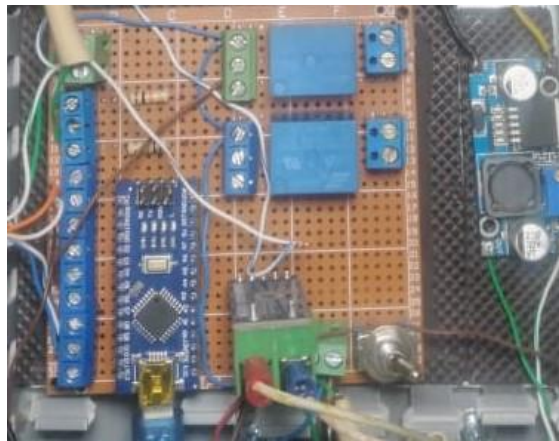


Figura 4.7. Base para el circuito electrónico.

4.9.2. Cuadro para la pantalla LCD 20x4

Se diseñó un recuadro para alojar la pantalla LCD 20x4 como medida de protección y estética para colocarla en la parte frontal del gabinete.



Figura 4.8. Cuadro para la pantalla LCD 20x4.

4.9.3. Base para acople del servomotor con válvula de gas.

Se diseñó una base en el cual sujeta y acopla el servomotor a la válvula de gas para que trabaje como control de flujo de llama de la flauta de gas.



Figura 4.9. Base para acople del servomotor con válvula de gas.

4.10. Anclaje de los elementos

4.10.1. Implementación de la termocupla tipo K

La termocupla tipo K se instala en el eje del tambor de la tostadora de café, específicamente en el centro de este, con el propósito de realizar la adquisición de datos relacionados con la temperatura en dicho sistema.



Figura 4.10. Centro del eje del tambor para el Ingreso de la termocupla tipo K.

4.10.2. Implementación del actuador

El actuador utilizado en esta aplicación, el servomotor, se conectará mediante acoplamiento directo en la llave de gas de la máquina tostadora de café. Esto permitirá al servomotor controlar la apertura y cierre de la llave de gas, proporcionando así una forma automatizada de regular el flujo de gas y, por ende, la temperatura en el proceso de tostado del café. Este acople se lo puede ver en la figura 4.9.

4.10.3. Implementación del gabinete de control

Se colocó un gabinete de control en una ubicación estratégica cercana a la tostadora de café, donde se llevó a cabo el ensamblaje de las componentes de control y potencia del proyecto. El gabinete de control proporciona un espacio apropiado y seguro para alojar los dispositivos y circuitos eléctricos necesarios para el funcionamiento del sistema implementado en la tostadora de café.



Figura 4.11. Gabinete de control del sistema.

4.11. Funcionamiento

Con la implementación del proyecto se ha demostrado un funcionamiento adecuado y eficiente de cada uno de los elementos. El sistema es de fácil manejo y se adapta perfectamente a las condiciones de altas temperaturas presentes en la máquina tostadora de café, gracias a las siguientes características:

El actuador utilizado en el sistema es un servomotor, el cual es controlado mediante la técnica de modulación por ancho de pulso (PWM), permitiendo regular de manera precisa el flujo de la llama en la flauta de la tostadora de café. La adquisición de datos de la máquina tostadora de café se realiza cada 2 segundos, lo que garantiza una lectura frecuente y actualizada de la temperatura. Una vez que el sistema es energizado, se inicializan las variables necesarias para el correcto funcionamiento del sistema. Posteriormente, los datos adquiridos son procesados por la tarjeta de control, que analiza la información y envía las indicaciones apropiadas al actuador, en este caso, a la servoválvula.

Previo al inicio del proceso de tostado del café, el grano de café presenta una humedad de 10.8%. Esta cifra de humedad se considera óptima para llevar a cabo el proceso de tostado de manera adecuada y eficiente. La humedad del grano de café influye significativamente en el resultado final del tostado, por lo que contar con un nivel de humedad adecuado es fundamental para obtener la calidad deseada en el producto final.



Figura 4.12. Dispositivo para la medición de la humedad del café.

Para la sintonización del controlador PID se utilizó el método de Ziegler-Nichols, el cual es un enfoque de sintonía de controladores ampliamente reconocido y utilizado en aplicaciones de control automático. Este método se basa en la obtención de las variables críticas del sistema mediante prueba y error. Las variables utilizadas en el método de Ziegler-Nichols para la sintonía del controlador PID fueron las siguientes:

Tabla 4.11. Variables para el control PID.

Kp	Ki	Kd
90	30	0

Se llevaron a cabo lecturas de temperatura para observar el comportamiento del sistema, obteniendo datos durante el proceso de tostado del café. Se pudo observar que la temperatura aumenta de manera progresiva a medida que transcurre el tiempo. Una vez que la temperatura alcanza su valor de referencia (setpoint), el actuador entra en funcionamiento y se puede apreciar cómo la temperatura comienza a regularse y mantenerse cercana a su valor objetivo. Esta acción de control del actuador permite mantener la temperatura dentro de los límites deseados durante todo el proceso de tueste de café.

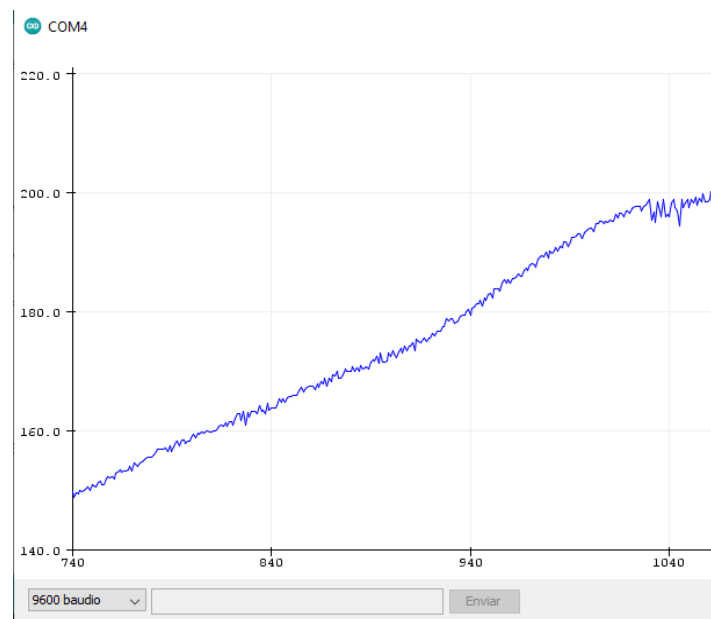


Figura 4.13. Curva de temperatura en tiempo real.

Durante el proceso experimental, se llevó a cabo un precalentamiento de la máquina tostadora de café con un setpoint de temperatura establecido en 180°C. En la Figura 4.14 se muestra de manera gráfica cómo la temperatura aumenta de manera progresiva en el tiempo. A medida que la temperatura se acerca a su valor objetivo (setpoint), el actuador entra en acción y comienza a regular el flujo de llama, lo cual se refleja en la curva de temperatura, que comienza a estabilizarse y mantenerse cercana al valor deseado. Este comportamiento demuestra que el sistema de control está respondiendo efectivamente para mantener la temperatura en el nivel especificado y alcanzar el objetivo de precalentamiento.

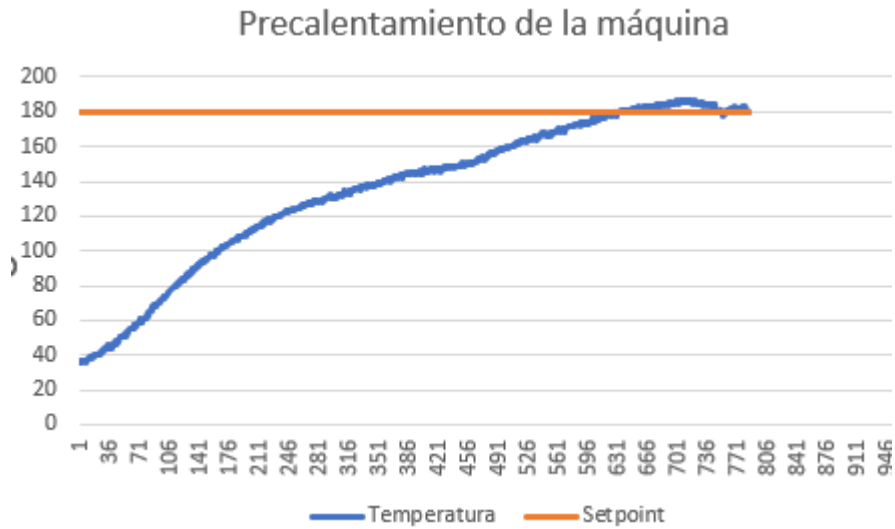


Figura 4.14. Curva de temperatura durante el precalentamiento de la tostadora.

Una vez completado el proceso de precalentamiento, se procede a introducir el café en la tostadora. Como se muestra en la Figura 4.15, se observa una disminución de la temperatura debido a la presencia de humedad en el café. Esta humedad actúa como un enfriador dentro del tambor de la tostadora, lo que provoca la reducción de la temperatura en el interior del mismo. Como resultado, el proceso se reinicia para alcanzar nuevamente el setpoint de 180°C.

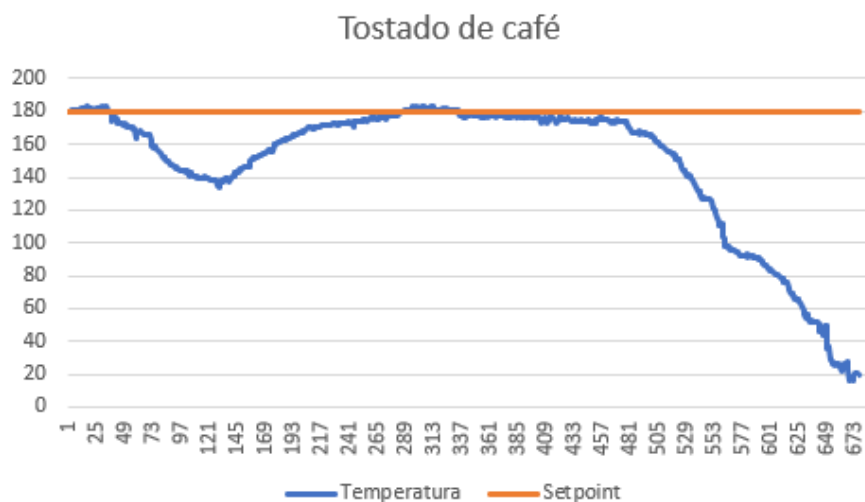


Figura 4.15. Curva de temperatura durante el tostado de café.

El sistema de control reacciona ante esta disminución de temperatura y el actuador entra en acción para regular nuevamente el flujo de llama y lograr que la temperatura se estabilice en el valor deseado. Este ciclo se repite durante el proceso de tostado para garantizar que la temperatura se mantenga constante y el café se tueste adecuadamente.

4.12. Manejo y mantenimiento del sistema

4.12.1. Manejo

El sistema implementado cuenta con una pantalla de visualización de parámetros ubicada en el gabinete de control. En este gabinete, se ha incorporado un encoder rotatorio que permite al usuario establecer el setpoint de temperatura deseado. El funcionamiento del sistema se encuentra en modo automático, lo que significa que el sistema es capaz de regular el flujo de gas en la flauta de la tostadora de café de forma autónoma. A medida que el sistema trabaja en modo automático, se puede observar en tiempo real cómo la curva de temperatura se va ajustando. Esto es posible gracias al control PID implementado, que actúa automáticamente para mantener la temperatura del tueste en el valor establecido como setpoint. El control PID evalúa continuamente la lectura de la termocupla tipo K instalada en el centro del eje del tambor, y en función de las variaciones de temperatura detectadas, ajusta la apertura de la servoválvula para regular el flujo de gas y mantener la temperatura del tueste en el valor deseado.

4.12.2. Mantenimiento del sistema

El mantenimiento del sistema debe llevarse a cabo de forma periódica debido a las condiciones de alta temperatura a las que está expuesto. Esto es esencial para prevenir la corrosión temprana de los componentes y prolongar su vida útil. Se han identificado dos secciones principales que requieren diferentes tipos de mantenimiento: la sección de control y la sección de potencia. Se deben realizar acciones de mantenimiento preventivo en ambas secciones para asegurar el correcto funcionamiento del sistema a lo largo del tiempo. Para obtener detalles específicos sobre el mantenimiento preventivo y correctivo de cada sección, se recomienda consultar el anexo G, donde se detallan las acciones y procedimientos a seguir para el cuidado y mantenimiento adecuado del sistema.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

En este capítulo, se presenta un resumen de los principales puntos tratados durante el desarrollo del proyecto de control de temperatura de la máquina tostadora de café.

- Se procedió a realizar la sintonización del controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) una vez que el módulo de control fue instalado en la máquina. Durante este proceso, se realizó una exhaustiva observación del comportamiento del sistema en condiciones tanto con carga como sin carga de café. Esta etapa permitió ajustar los parámetros del controlador para optimizar su rendimiento y lograr la máxima eficiencia en el control de la temperatura.
- El sistema de control fue sometido a una exitosa validación al ser implementado en la máquina tostadora de café. Durante este proceso, se logró una adecuada adaptación de los elementos del sistema a la Interfaz Hombre-Máquina (HMI), haciendo uso de software libre que brinda la flexibilidad necesaria para realizar futuras modificaciones y mejoras con propósitos académicos. La validación confirmó que el sistema de control es funcional y cumple con los objetivos planteados en el proyecto.
- Se empleó una Termocupla tipo K en el sistema, lo cual produjo una mejora notable en los resultados de medición de temperatura. Esta Termocupla fue linealizada y

acondicionada mediante un transmisor tipo MAX6675, permitiendo obtener una salida analógica de dos cables en un rango de 4 a 20 mA. Esta configuración garantiza una adecuada adquisición y transmisión de los datos de temperatura al sistema de control, asegurando una precisa y confiable operación del sistema.

- El control PID implementado para el tostado de café ha demostrado ser eficiente y efectivo en el proceso de regulación de la temperatura en la máquina tostadora. La sintonización cuidadosa del controlador permitió adaptarlo adecuadamente al comportamiento de la máquina, logrando una respuesta rápida y precisa ante los cambios de temperatura. El control PID ha demostrado su capacidad para mantener la temperatura en rangos específicos durante el proceso de tostado, garantizando así una óptima calidad en el resultado final del café tostado.

5.2. Recomendaciones

- Para futuros trabajos de tesis, se sugiere considerar la implementación de un desfogue de presión mediante un extractor dentro del tambor de la máquina tostadora de café. Esta mejora tiene como objetivo optimizar el control PID del sistema y ofrecer beneficios adicionales. El desfogue de presión permitirá mantener una presión controlada y constante dentro del tambor, lo que podría contribuir a una distribución más uniforme del calor durante el proceso de tostado. Además, al regular la presión interna, se podrían evitar fluctuaciones inesperadas en la temperatura, lo que ayudaría a mantener un control más preciso y estable de la temperatura del café durante el tostado.
- Basado en los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, se recomienda llevar a cabo un precalentamiento del horno durante un período de 15 a 20 minutos antes de iniciar el proceso de tostado. El precalentamiento previo asegura que la máquina esté en condiciones óptimas para el tostado, lo que contribuye a mantener las propiedades y características deseadas del café durante el proceso.

Referencias

- [1] L. D. Buesaquillo, «Sistema de control para mejorar el desempeño de una máquina tostadora de café (Tesis de pregrado).», UTN, Ibarra, 2019.
- [2] J. P. Pozo, «Diseño y construcción de un tostador por resistencias (Tesis de pregrado).», UTN, Ibarra, 2016.
- [3] J. J. Arciniega, «Diseño, simulación, y propuesta de automatización de una máquina de café con capacidad de 25lb dirigida a la producción cafetalera (Tesis de pregrado).», UNL, Loja, 2016.
- [4] J. I. Chugá, «Evaluación de los parámetros tiempo, temperatura y variedad de café arábica coffea arábica Castillo y típica en el proceso de tostado (Tesis pregrado).», UTN, Ibarra, 2018.
- [5] Crafters Coffe, «Una guía para iniciar un negocio de tostado de café en el hogar», Post Falls, 2015. [En línea]. Available: <https://goo.su/dRBRqWt>.
- [6] J. H. Kuper, «Fundamentos del tostado de café», Cofee Company, Hawaii, 2009.
- [7] C. Asfahl, «Seguridad Industrial Y Salud», Prentice-Hall Hispanoamericana, México, 2000.
- [8] U. Juárez, «Sin estrategia para combatir “huachigas”, reconoce la Amexgas», Energia a Debate, 23 Marzo 2023. [En línea]. Available: <https://energiaadebate.com/sin-estrategia-para-combatir-huachigas-reconoce-la-amexgas/>.
- [9] F. White, «Mecánica De Fluidos», MacGraw-Hill, Madrid, 2010.
- [10] SERVICAT, «Regulador industrial SAMPER para toda cocina industrial», [En línea]. Available: https://repuestoslineablanca.com/COCINAS/6353-RESERVADO__VALVULA_FOR_3_8_HOSE.html.
- [11] L. Avila, «Sistemas automatizados», UNAM, Quito, 2022.
- [12] U. N. d. E. a. Distancia, «Funciones básicas, características y arquitectura de los sistemas automatizados», UNED, Madrid, 2022.

- [13] A. ENERGY, «Pirámide de automatización,» [En línea]. Available: <https://atec-energy.com/Blog/piramide-de-automatizacion-cim>.
- [14] K. J. Åtrom y T. Hägglund, «Controladores PID: Teoría, diseño y afinación,» ISA, 2006.
- [15] R. P. Ñeco, «Apuntes de sistemas de control,» Ecu: San Vicente (Alicante), 2013.
- [16] Slicetex Electronics, «Nota de Aplicación AN033: Control PID para PLC,» Córdoba Argentina, 2019.
- [17] B. Kuo, «Sistemas de control digital,» CECOSA. 7ma Edición, 2000.
- [18] R. C. Dorf y R. H. Bishop, «Sistemas de control moderno,» Madrid, Pearson Educación, 2007.
- [19] «Fusión de ingeniería, control, codificación, aprendizaje automático y ciencia,» 9 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://goo.su/GSFUTmF>.
- [20] K. Kim y R. C. Schaefer, «Ajuste de un controlador PID para un sistema de control digital,» IEEE, 2005.
- [21] V. Alfaro, «Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores,» San José, Costa Rica, 2002.
- [22] K. Ogata, «Ingeniería de control moderna,» Madrid, Pearson Educación, 2010.
- [23] J. Salt, Á. Cuenca, V. Casanova y A. Correcher, «Control automático: Tiempo continuo y tiempo discreto,» Barcelona, España, Reverté, 2015.
- [24] D. Lozano, «Arduino Práctico,» Madrid, Anaya Multimedia, 2017.
- [25] Ó. Torrente, «Arduino, curso práctico de formación,» México, Alfaomega, 2013.
- [26] I. Moreno, «Apuntes de instrumentación electrónica,» Burgos, España, Universidad de Burgos, 2013.
- [27] ENGINEERED MATERIALS SOLUTIONS, «Thermostatic Bimetal Designer's Guide,» [En línea]. Available: https://www.emsclad.com/fileadmin/Data/Divisions/EMS/Header/Bimetal_Desingers_Guide.pdf.
- [28] L. Corona, S. Abarca y J. Mares, «Sensores,» Grupo Editorial Patria, 2014.
- [29] CEIV, «Termopares,» [En línea]. Available: <https://ceiv.com.mx/>.
- [30] L. Salas, «Protocolos de Comunicación Spi, I2C, serial y USB,» Universidad Manuela Beltrán, Bogotá, 2021.
- [31] E. S. Academy, «History of the I2C Bus.,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.esacademy.com/en/library/technical-articlesand-documents/miscellaneous/i2c-bus/general-introduction/history-of-thei2c-bus.html>.
- [32] G. Bacca, «Dinámica No-Lineal de Un Servomecanismo Neumático de Posicionamiento,» Editorial Academica Espanola, Barcelona, 2011.

- [33] D. Chóez, «Control PWM Con Servomotores,» Universidad Politecnica Salesiana, Quito, 2019.
- [34] AREATECNOLOGIA, «Servomotores,» [En línea]. Available: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/servomotor.html>.
- [35] O. Torrente, «El mundo GENUINO-ARDUINO. Curso práctico de formación,» Alfaomega, 2016.
- [36] Arduino, «Datasheet Arduino Nano,» 2021 b. [En línea]. Available: <https://repo.undiksha.ac.id/1980/9/1705031010-LAMPIRAN.pdf>.
- [37] Arduino.cl, «Software de arduino,» [En línea]. Available: <https://arduino.cl/programacion/>.
- [38] B. P. Guillermina, «Metodología de la investigación,» Grupo Editorial Patria, 2017.
- [39] SUCONEL, «Termopar tipo K,» [En línea]. Available: <https://suconel.com/product/termopar-tipo-k-tornillo-0c450c-tipokb/#:~:text=Agotado-,Termopar%20Tipo%20K%20Tornillo%20TIPOKB%2C%20es%20un%20sensor%20de%20temperatura,es%20proporcional%20a%20la%20temperatura..>

Anexos

Anexo A: Evaluación de sensores de temperatura

Tamaño	RTD (PT100)	Termocupla tipo K	Termocupla tipo J	$\Sigma+1$	Ponderación
RTD (PT100)	-	1	1	3	0.5
Termocupla tipo K	0	-	0.5	1.5	0.25
Termocupla tipo J	0	0.5	-	1.5	0.25
Suma:				6	1

Conectividad	RTD (PT100)	Termocupla tipo K	Termocupla tipo J	$\Sigma+1$	Ponderación
RTD (PT100)	-	0	0	1	0.16
Termocupla tipo K	1	-	0.5	2.5	0.42
Termocupla tipo J	1	0.5	-	2.5	0.42
Suma:				6	1

Disponibilidad	RTD (PT100)	Termocupla tipo K	Termocupla tipo J	$\Sigma+1$	Ponderación
RTD (PT100)	-	0	0	1	0.16
Termocupla tipo K	1	-	0.5	2.5	0.42
Termocupla tipo J	1	0.5	-	2.5	0.42
Suma:				6	1

Precisión	RTD (PT100)	Termocupla tipo K	Termocupla tipo J	$\Sigma+1$	Ponderación
RTD (PT100)	-	0	0	1	0.16
Termocupla tipo K	1	-	1	3	0.5
Termocupla tipo J	1	0	-	2	0.33
Suma:				6	1

Protección	RTD (PT100)	Termocupla tipo K	Termocupla tipo J	$\Sigma+1$	Ponderación
RTD (PT100)	-	1	1	3	0.5
Termocupla tipo K	0	-	0.5	1.5	0.25
Termocupla tipo J	0	0.5	-	1.5	0.25
Suma:				6	1

Anexo B: Termocupla tipo K



Descripción

Las Termocuplas son muy sensibles, por lo que necesitan de un buen amplificador y de una compensación de junta fría (cold junction). La termocupla tipo K y su respectivo transmisor MAX6675 son lo necesario para realizar mediciones de temperatura en un amplio rango (0-1023°C) con buena linealidad y precisión.

Características:

- Voltaje de Operación: 5V.
- Corriente de trabajo: 50mA.
- Rango de Temperaturas Termocupla: -200°C hasta 1300°C.
- Resolución Transmisor MAX6675: 12 bits (0°C – 1023°C).
- Resolución de temperatura: 0.25°C.
- Modo de salida: SPI.
- Posee agujeros para montaje.
- Dimensiones: 25mm * 15mm * 13mm.
- Longitud cable: 36.5cm.
- Longitud total: 49cm.

Anexo C: Evaluación de pantallas

Tamaño	Pantalla LCD 16x2	Pantalla LCD 20x4	Pantalla LCD 128x64	$\Sigma+1$	Ponderación
Pantalla LCD 16x2	-	0	0	1	0.16
Pantalla LCD 20x4	1	-	0	2	0.33
Pantalla LCD 128x64	1	1	-	3	0.5
Suma:				6	1

Resolución	Pantalla LCD 16x2	Pantalla LCD 20x4	Pantalla LCD 128x64	$\Sigma+1$	Ponderación
Pantalla LCD 16x2	-	0	0	1	0.16
Pantalla LCD 20x4	1	-	0	2	0.33
Pantalla LCD 128x64	1	1	-	3	0.5
Suma:				6	1

Comunicación	Pantalla LCD 16x2	Pantalla LCD 20x4	Pantalla LCD 128x64	$\Sigma+1$	Ponderación
Pantalla LCD 16x2	-	0.5	0.5	2	0.33
Pantalla LCD 20x4	0.5	-	0.5	2	0.33

Pantalla LCD 128x64	0.5	0.5	-	2	0.33
Suma:				6	1

Costo	Pantalla LCD 16x2	Pantalla LCD 20x4	Pantalla LCD 128x64	$\Sigma+1$	Ponderación
Pantalla LCD 16x2	-	1	1	3	0.5
Pantalla LCD 20x4	0	-	1	2	0.33
Pantalla LCD 128x64	0	0	-	1	0.16
Suma:				6	1

Disponibilidad	Pantalla LCD 16x2	Pantalla LCD 20x4	Pantalla LCD 128x64	$\Sigma+1$	Ponderación
Pantalla LCD 16x2	-	0.5	1	2.5	0.42
Pantalla LCD 20x4	0.5	-	1	2.5	0.42
Pantalla LCD 128x64	0	0	-	1	0.17
Suma:				6	1

Anexo D: Pantalla LCD 20x4

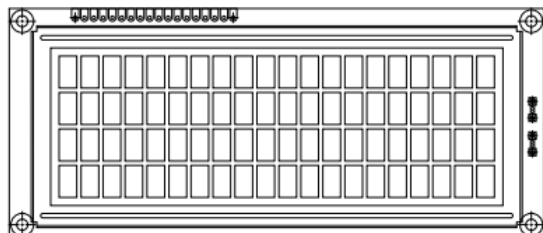


www.vishay.com

LCD-020N004L

Vishay

20 x 4 Character LCD



FEATURES

- Type: Character
- Display format: 20 x 4 characters
- Built-in controller: ST 7066 (or equivalent)
- Duty cycle: 1/16
- 5 x 8 dots includes cursor
- + 5 V power supply (also available for + 3 V)
- LED can be driven by pin 1, pin 2, pin 15, pin 16 or A and K
- N.V. optional for + 3 V power supply
- Material categorization: For definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912

RoHS
COMPLIANT

MECHANICAL DATA		
ITEM	STANDARD VALUE	UNIT
Module Dimension	146.0 x 62.5	mm
Viewing Area	123.5 x 43.0	
Dot Size	0.92 x 1.10	
Dot Pitch	0.98 x 1.16	
Mounting Hole	139.0 x 55.5	
Character Size	4.84 x 9.22	

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS					
ITEM	SYMBOL	STANDARD VALUE			UNIT
		MIN.	TYP.	MAX.	
Power Supply	V_{DD} to V_{SS}	- 0.3	-	7.0	V
Input Voltage	V_I	- 0.3	-	V_{DD}	

Note

- $V_{SS} = 0$ V, $V_{DD} = 5.0$ V

ELECTRICAL CHARACTERISTICS						
ITEM	SYMBOL	CONDITION	STANDARD VALUE			UNIT
			MIN.	TYP.	MAX.	
Input Voltage	V_{DD}	$V_{DD} = +5$ V	4.7	5.0	5.3	V
		$V_{DD} = +3$ V	2.7	3.0	5.3	
Supply Current	I_{DD}	$V_{DD} = +5$ V	-	8.0	10.0	mA
Recommended LC Driving Voltage for Normal Temperature Version Module	V_{DD} to V_0	- 20 °C	5.0	5.1	5.7	V
		0 °C	4.6	4.8	5.2	
		25 °C	4.1	4.5	4.7	
		50 °C	3.9	4.2	4.5	
		70 °C	3.7	3.9	4.3	
LED Forward Voltage	V_F	25 °C	-	4.2	4.6	V
LED Forward Current	I_F	25 °C	-	540	1080	mA
EL Power Supply Current	I_{EL}	$V_{EL} = 110$ V _{AC} , 400 Hz	-	-	5.0	mA

OPTIONS									
PROCESS COLOR						BACKLIGHT			
TN	STN Gray	STN Yellow	STN Blue	FSTN B&W	STN Color	None	LED	EL	CCFL
x	x	x	x	x		x	x	x	

For detailed information, please see the "Product Numbering System" document.

DISPLAY CHARACTER ADDRESS CODE																					
Display Position		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
DD RAM Address		00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F	10	11	12	13
DD RAM Address		40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	4A	4B	4C	4D	4E	4F	50	51	52	53
DD RAM Address		14	15	16	17	18	19	1A	1B	1C	1D	1E	1F	20	21	22	23	24	25	26	27
DD RAM Address		54	55	56	57	58	59	5A	5B	5C	5D	5E	5F	60	61	62	63	64	65	66	67

Anexo E: Evaluación de la tarjeta de procesamiento

Tamaño	Arduino Nano	PLC LOGO! 12/24	$\Sigma+1$	Ponderación
Arduino Nano	-	1	2	0.67
PLC LOGO! 12/24	0	-	1	0.33
Suma:			3	1

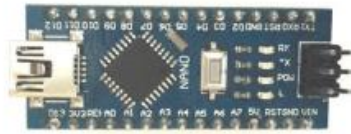
Procesamiento	Arduino Nano	PLC LOGO! 12/24	$\Sigma+1$	Ponderación
Arduino Nano	-	0	1	0.33
PLC LOGO! 12/24	1	-	2	0.67
Suma:			3	1

Precio	Arduino Nano	PLC LOGO! 12/24	$\Sigma+1$	Ponderación
Arduino Nano	-	1	2	0.67
PLC LOGO! 12/24	0	-	1	0.33
Suma:			3	1

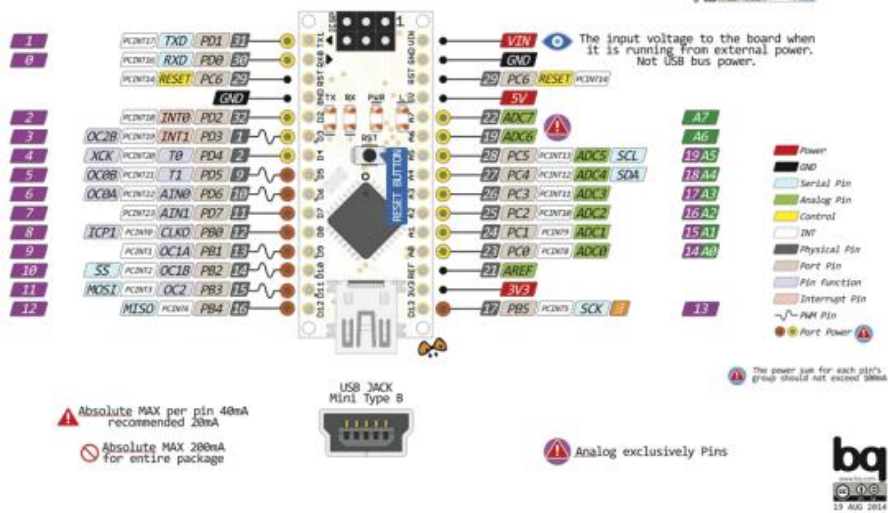
Anexo F: Arduino Nano



Datasheet Arduino Nano



NANO PINOUT



Arduino Nano Technical Specifications

Microcontroller	ATmega328P – 8 bit AVR family microcontroller
Operating Voltage	5V
Recommended Input Voltage for Vin pin	7-12V
Analog Input Pins	6 (A0 – A5)
Digital I/O Pins	14 (Out of which 6 provide PWM output)
DC Current on I/O Pins	40 mA
DC Current on 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (2 KB is used for Bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frequency (Clock Speed)	16 MHz
Communication	IIC, SPI, USART

Anexo G: Manual de mantenimiento.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

MANUAL DE USUARIO

Ibarra – Ecuador

2023

Introducción:

El propósito del presente manual técnico es proporcionar una guía detallada al operario para el manejo adecuado del sistema implementado en el invernadero. Este manual está diseñado para ofrecer instrucciones claras y precisas sobre las operaciones, configuraciones y mantenimiento del sistema, con el fin de garantizar un funcionamiento óptimo y seguro.

Componentes

Gabinete

Para la automatización del sistema, se ha seleccionado e implementado un gabinete de dimensiones 30x20, el cual ha sido diseñado específicamente para albergar los componentes de control y potencia de manera organizada y segura. El gabinete ha sido ubicado estratégicamente para facilitar el acceso y la manipulación del sistema.



En la parte frontal del gabinete, se han dispuesto los botones y elementos de manejo del sistema. Estos botones permiten al operario llevar a cabo diversas acciones, como iniciar o detener el funcionamiento del sistema, ajustar los parámetros de control y visualizar información relevante en la pantalla.



Dentro del gabinete, en la parte interna, se alojan todos los elementos necesarios para que el sistema funcione de manera óptima. Estos componentes incluyen el controlador PID, los dispositivos de medición de temperatura, el sistema de adquisición de datos, los actuadores y otros circuitos eléctricos y electrónicos.

Manual de Mantenimiento

Es fundamental llevar a cabo un mantenimiento periódico de los componentes que integran el sistema de control de temperatura. El presente manual proporciona una descripción detallada de los procedimientos necesarios para realizar un mantenimiento general.

Tabla 1.- Tablero de control

TIEMPO	ACTIVIDAD POR REALIZAR
Trimestral	Verificar continuidad en los componentes del gabinete de control
	Revisar elementos de potencia
	Revisar cableado
	Revisar terminales
	Verificar las conexiones del MAX6675
	Verificar las conexiones de la servoválvula
Mensual	Verificar pantalla
	Verificar que las perillas funciones correctamente

	Revisar Arduino
	Revisar relés
	Revisar envío de datos del sensor de temperatura
Semanal	Revisar impermeabilidad del gabinete
	Revisar protectores de elementos de control

Mantenimiento general

Para realizar un mantenimiento general del sistema de control de temperatura, es necesario seguir los siguientes pasos de forma sistemática y cuidadosa:

- Analizar los problemas
- Analizar las posibles causas
- Buscar las soluciones

Mantenimiento correctivo

Para los siguientes posibles problemas que puedan presentarse en el proyecto, se debe realizar un mantenimiento correctivo. A continuación, se describen algunas posibles fallas y las acciones que debe realizar el operario para corregirlas:

Tabla 2.- Mantenimiento del sistema de control

Problema	Causa	Solución
Sistema de control no enciende	No hay alimentación	-Verificar continuidad
	Corto circuito	-Verificar conexiones
	Terminales desconectadas	-Cambio de componentes
	Pines mal conectados	-Verificar sensor de temperatura.
	Componentes quemados	
	Sensores desconectados o averiados	

Tabla 2.- Mantenimiento del sistema de potencia

Problema	Causa	Solución
Sistema de control no acciona	No hay alimentación	-Verificar continuidad
	Corto circuito	-Verificar conexiones
	Terminales desconectadas	-Cambio de componentes quemados
	Componentes dañados	

Mantenimiento Preventivo:

El mantenimiento preventivo es una práctica fundamental para garantizar la prolongación de la vida útil de los componentes y asegurar el correcto funcionamiento del sistema de control de temperatura en la máquina tostadora de café. Se recomienda realizar el mantenimiento preventivo cada 2 meses para mantener el sistema en óptimas condiciones. A continuación, se describen las principales actividades a realizar durante el mantenimiento preventivo:

- **Limpieza:** Se debe llevar a cabo una limpieza exhaustiva de todos los elementos y componentes del sistema. Esto incluye la eliminación de polvo, suciedad o residuos que puedan acumularse en la pantalla, botones, sensores, actuadores y cualquier otra parte del sistema.
- **Inspección visual:** Es importante realizar una inspección visual detallada de todos los elementos del sistema para detectar posibles signos de desgaste, corrosión o daños físicos. Si se encuentra algún componente dañado o desgastado, se debe proceder a su reparación o reemplazo.
- **Verificación de conexiones eléctricas:** Se debe revisar minuciosamente todas las conexiones eléctricas para asegurarse de que estén bien sujetas y no presenten deterioro. Las conexiones flojas o dañadas pueden provocar mal funcionamiento del sistema.
- **Calibración:** Durante el mantenimiento preventivo, se debe verificar la calibración del sensor de temperatura y del controlador PID. Es importante asegurarse de que las lecturas del sensor sean precisas y que el controlador esté ajustado adecuadamente.
- **Actualizaciones de software:** Es recomendable verificar si existen actualizaciones disponibles y, en caso necesario, realizar las actualizaciones para mejorar el rendimiento y la seguridad del sistema.

Anexo H: Código de arduino.

```

unsigned long tiempo1 = 0;
unsigned long tiempo2 = 0;
unsigned long tiempoSegundos = 0;

/*Configuración de LCD con I2C*/
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4); //La dirección es 0x27 para la LCD.
/* i2c LCD Module ==> Arduino
* SCL      ==>  A5
* SDA      ==>  A4
* Vcc      ==>  Vcc (5v)
* Gnd      ==>  Gnd  */

/*Pines para el SPI con MAX6675*/
#include <SPI.h>
const int MAX6675_CS = 10;    //Pin6 del Max6675.
const int MAX6675_SO = 12;    //Pin7 del Max6675.
const int MAX6675_SCK = 13;   //Pin5 del Max6675.
/* Max6675 Module ==> Arduino
* CS       ==>  D10
* SO       ==>  D12
* SCK      ==>  D13
* Vcc      ==>  Vcc (5v)
* Gnd      ==>  Gnd  */

/*Variables Encoder Rotatorio*/
const int clk = 8;    //Pin 1 del encoder rotatorio.
const int dat = 9;    //Pin 2 del encoder rotatorio.
/* Encoder      ==>  Arduino

```

```

* CLK      ==>  D8
* DATA    ==>  D9
* PUL      ==>  D11
* Vcc      ==>  Vcc (5v)
* Gnd      ==>  Gnd  */

```

```
/*Vraiables for rotary encoder state detection*/
```

```
int clk_State;
int Last_State;
bool dt_State;
```

```
/*Variables PWM del Servomotor*/
```

```
const int PWM_pin = 3; //Pin para la señal PWM del servomotor.
```

```
#include <Servo.h>
```

```
int PosServo = 0;
```

```
Servo myservo; //Creamos un objeto servo.
```

```

/* Servo FT5330M ==>  Arduino
* Señal Pin    ==>  D3
* Vcc          ==>  Vcc (7.33v)
* Gnd          ==>  Gnd  */

```

```
/*Variables Entradas y Salidas*/
```

```
const int Rele1 = 5;
```

```
const int Rele2;
```

```
const int BotonV = 7;
```

```
const int BotonR = 6;
```

```
int val;
```

```
int vall;
```

```

/*Variables PID*/

float set_temperature = 0; //El ajuste de temperatura por default déjalo en 0 y contrólalo
con encoder rotatorio.

float temperature_read = 0.0;
float PID_error = 0;
float previous_error = 0;
float elapsedTime, Time, timePrev;
float PID_value = 0;
int button_pressed = 0;
int menu_activated = 0;
float last_set_temperature = 0;
int contador = 0;

/*Constantes PID*/

int kp = 90; //Constante proporcional.
int ki = 30; //Constante integral.
int kd = 0; //Constante derivativa.

int PID_p = 0;
int PID_i = 0;
int PID_d = 0;
float last_kp = 0;
float last_ki = 0;
float last_kd = 0;
int PID_values_fixed = 0;

////////////////////////////////////

void setup() {
  tiempo1 = millis();

  /*Entradas*/

```

```

pinMode(BotonV,INPUT); //Botón verde.
pinMode(BotonR,INPUT); //Botón rojo.

/*Salidas*/
pinMode(Rele1,OUTPUT); //Luz indicadora verde y rojo.
pinMode(Rele2,OUTPUT); //Luz indicadora anaranjada.

myservo.attach(3);

pinMode(PWM_pin,OUTPUT);

TCCR2B = TCCR2B & B11111000 | 0x03; //Pin 3 y 11 frecuencia PWM de 928.5 Hz.
Time = millis();

Last_State = (PINB & B00000001); //Detectar el primer estado del encoder.

PCICR |= (1 << PCIE0); //Habilitar escaneo PCMSK0.
PCMSK0 |= (1 << PCINT0); //Configure el pin D8 para activar una interrupción
PCMSK0 |= (1 << PCINT1); //Configure el pin D9 para activar una interrupción
PCMSK0 |= (1 << PCINT3); //Configure el pin D11 para activar una interrupción

pinMode(8,INPUT); //Pin 1 del encoder rotatorio.
pinMode(9,INPUT); //Pin 2 del encoder rotatorio.
pinMode(11,INPUT); //Pin 3 del encoder rotatorio.

lcd.noBacklight(); //Pantalla lcd apagada.
delay(250);

Serial.begin(9600);
} //Final del Void Setup

```

```
////////////////////////////////////
```

```
void loop() {
  val = digitalRead(BotonV);    //Botón de encendido.
  val1 = digitalRead(BotonR);   //Botón de apagado.

  if (val == HIGH or contador == 1){ //Encendido del circuito.

    digitalWrite(Rele1,HIGH);    //Encendido de la luz indicadora rojo.

    if (contador == 0){          //Pantalla de bienvenida en LCD.
      lcd.init();
      lcd.backlight();
      lcd.clear();
      lcd.setCursor(0,0);
      delay(1000);
      lcd.print("CONTROL TEMPERATURA");
      lcd.setCursor(0,1);
      delay(1000);
      lcd.print(" MAQUINA TOSTADORA");
      lcd.setCursor(0,2);
      delay(1000);
      lcd.print(" ");
      lcd.setCursor(0,3);
      delay(1000);
      lcd.print("POR: Daniel Castillo");
      delay(2000);
      for(int i = 0; i < 5; i++)
      {
        lcd.backlight();
        delay(250);
      }
    }
  }
}
```



```

    lcd.noBacklight();
    delay(250);
}
lcd.clear();
lcd.backlight(); //Encendido de la pantalla LCD.
delay(500);
contador = 1;
} //Final de pantalla de bienvenida en LCD.

tiempo2 = millis();
if(tiempo2 > (tiempo1 + 1000)){ //Si ha pasado 1 segundo ejecuta el IF.
    tiempo1 = millis(); //Actualiza el tiempo actual.
    tiempoSegundos = tiempo1/1000;
    //Serial.print("Ha transcurrido: ");
    Serial.println(temperature_read,1);
}

if(menu_activated==0)
{
    // Primero leemos el valor real de la temperatura
    temperature_read = readThermocouple();
    //Luego calculamos el error entre el setpoint y el valor real
    PID_error = set_temperature - temperature_read + 3;
    //Calcular el valor P
    PID_p = 0.01*kp * PID_error;
    //Calcular el valor I en un rango en +-3
    PID_i = 0.01*PID_i + (ki * PID_error);

    //Para la derivada necesitamos tiempo real para calcular la tasa de cambio de velocidad
    timePrev = Time; // la hora anterior se almacena antes de la lectura de la hora real

```

```

Time = millis();                // lectura en tiempo real
elapsedTime = (Time - timePrev) / 1000;
//Ahora podemos calcular el valor D
PID_d = 0.01*kd*((PID_error - previous_error)/elapsedTime);
//El valor PID total final es la suma de P + I + D
PID_value = PID_p + PID_i + PID_d;

//Definimos rango de PWM entre 0 y 255
if(PID_value < 0)
{  PID_value = 0;  }
if(PID_value > 180)
{  PID_value = 180;  }
//Ahora podemos escribir la señal PWM al mosfet en el pin digital D3

//Como activamos el MOSFET con un 0 a la base del BJT, escribimos 255-valor PID
myservo.write(180-PID_value);
previous_error = PID_error; //Recuerde almacenar el error anterior

delay(250); // Frecuencia de actualización + retraso de impresión LCD
//lcd.clear();

lcd.setCursor(0,0);
lcd.print(" PID TEMP CONTROL");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("          ");
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("SET :");
lcd.setCursor(5,2);
lcd.print(set_temperature,1);

```

```

    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("TEM :");
    lcd.setCursor(5,3);
    lcd.print(temperature_read,1);
    //Serial.println(temperature_read,1);

} //fin del menú 0 (control PID)

//Primera página del menú (punto de ajuste temporal)
if(menu_activated == 1)
{
    //analogWrite(PWM_pin,255);
    if(set_temperature != last_set_temperature)
    {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Set temperature");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print(set_temperature);
    }
    last_set_tet_temperature = set_temperature;

} //fin del menú 1

} //Final del encendido del circuito

if (val1 == LOW && contador == 1){ //Apagado del circuito.
    contador = 0;
    lcd.clear();
    digitalWrite(Rele1,LOW); //Encendido de la luz indicadora rojo.
}

```

```

    lcd.noBacklight();           //Apagado de la pantalla LCD.
    delay(250);
} //Final del apagado del circuito.

} //Final del Void Loop

////////////////////////////////////

//La función que lee los datos SPI de MAX6675
double readThermocouple() {

    uint16_t v;
    pinMode(MAX6675_CS, OUTPUT);
    pinMode(MAX6675_SO, INPUT);
    pinMode(MAX6675_SCK, OUTPUT);

    digitalWrite(MAX6675_CS, LOW);
    delay(1);

    v = shiftIn(MAX6675_SO, MAX6675_SCK, MSBFIRST);
    v <<= 8;
    v |= shiftIn(MAX6675_SO, MAX6675_SCK, MSBFIRST);

    digitalWrite(MAX6675_CS, HIGH);
    if (v & 0x4)
    {
        // El bit 2 indica si el termopar está desconectado
        return NAN;
    }

    // Los tres bits inferiores (0,1,2) son bits de estado descartados

```

```

v >>= 3;

// Los bits restantes son el número de conteos de 0,25 grados (C)
return v*0.25;
}

//El vector de interrupción para pulsador y codificador rotatorio
ISR(PCINT0_vect){
if(menu_activated==1)
{
clk_State = (PINB & B00000001); // estado del pin 8? ¿Es alto?
dt_State = (PINB & B00000010);
if (clk_State != Last_State){
// Si el estado de los datos es diferente al estado del reloj.
if (dt_State != clk_State) {
set_temperature = set_temperature+0.5 ;
}
else {
set_temperature = set_temperature-0.5;
}
}
Last_State = clk_State; // Actualiza el estado anterior del reloj con el estado actual
}
//¿Se presionó el botón!
if (PINB & B00001000) //Pin D11 is HIGH?
{
button_pressed = 1;
}
//Navegamos por los 4 menús con cada botón pulsado
else if(button_pressed == 1)
{

```

```
if(menu_activated==1)
{
  menu_activated = 0;
  PID_values_fixed=1;
  button_pressed=0;
  delay(1000);
}

if(menu_activated==0 && PID_values_fixed != 1)
{
  menu_activated = menu_activated + 1;
  button_pressed=0;
  set_temperature = set_temperature+1;
  delay(1000);
}
PID_values_fixed = 0;
}
}
```