

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Diseño de un horno rotatorio inteligente para pizza artesanal

INGE-2524

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecatrónico**

Presentado por:

Zaida Anabell Mora Almeida

Hazel Vianna Tambaco Montaña

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

## Dedicatoria

---

Dedico este documento a mi familia que, con su amor incondicional, sus palabras de aliento, y su fe inquebrantable en mis capacidades, me han dado la fortaleza necesaria para seguir adelante, incluso en los momentos más desafiantes. A mis amigos, cuya compañía y apoyo constante han sido una fuente de motivación e inspiración.

Este logro es, en gran parte, fruto del cariño, la paciencia y el apoyo que todos ustedes me han brindado. Gracias por creer en mí y por estar a mi lado en cada paso de este recorrido.

**Zaida Mora**

## **Dedicatoria**

---

Es un honor dedicar este documento a mi querida familia, en especial a mis padres, cuyo constante respaldo ha sido mi mayor fuente de fortaleza. También quiero expresar mi sincero agradecimiento a mis amigos, cuya compañía y apoyo han sido esenciales para alcanzar este logro. Este proyecto es el resultado del amor y esfuerzo conjunto de aquellos que han estado siempre a mi lado.

**Hazel Tambaco**

## Agradecimientos

---

Mi más sincero agradecimiento a mi compañera de proyecto, Hazel Tambaco, por su dedicación, compromiso y valiosas aportaciones que fueron esenciales para la realización de este trabajo. A los Ph.D. Carlos Saldarriaga, Ph.D. Jorge Hurel y Ph.D. Marcelo Fajardo, por su guía, conocimiento, apoyo constante y aportaciones técnicas que enriquecieron este proyecto en cada etapa. Sus consejos y colaboración han sido fundamentales para superar cada desafío y elevar la calidad de este trabajo. A todos ellos, mi más sincero reconocimiento y gratitud.

**Zaida Mora**

## Agradecimientos

---

Quiero expresar mi más sincera gratitud a mi familia, cuyo amor y constante apoyo han sido la fuerza que me ha impulsado. A mi compañera de proyecto, Zaida Mora, le agradezco por su compromiso y esfuerzo; sin su dedicación, este logro no habría sido posible. También quiero agradecer profundamente al Ph.D. Carlos Saldarriaga y al Ph.D. Jorge Hurel, por su valiosa orientación y conocimientos, que resultaron cruciales para la exitosa finalización de este proyecto.

**Hazel Tambaco**

## Declaración Expresa

---

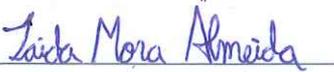
Nosotros Zaida Anabell Mora Almeida y Hazel Vianna Tambaco Montaña acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 23 de Mayo del 2024.

  
Zaida Anabell Mora  
Almeida

  
Hazel Vianna Tambaco  
Montaña

## **Evaluadores**

---

**Jorge Hurel, Ph.D.**

Profesor de Materia

---

**Carlos Saldarriaga. Ph.D.**

Tutor de proyecto

## Resumen

El presente proyecto se enfoca en el desarrollo de un horno rotatorio inteligente de pizzas, diseñado para mejorar la uniformidad en la cocción. El objetivo principal es implementar un sistema de control preciso de la temperatura y la velocidad de rotación, debido a la necesidad de equipos de mayor calidad de forma local y la reducción de costos operativos. Para llevar a cabo este proyecto, se utilizó un Arduino Mega para el control del sistema, acompañado por un control PID para la velocidad y un sensor de temperatura tipo K con un control de histéresis para la temperatura. Se realizaron pruebas con diferentes configuraciones de resistencias para el alcance y la conservación de la temperatura para el análisis de la estructura de la cámara de cocción. Los resultados demostraron que el horno desarrollado alcanza y mantiene los rangos de temperatura de operación deseados, la eficiencia de los controles implementados mejora el proceso de cocción, además de aumentar la producción en comparación con hornos tradicionales. Se concluye que el horno rotatorio desarrollado es una solución viable para mejorar la eficiencia operativa en pizzerías locales.

**Palabras Clave:** control PID, histéresis, conservación, pérdidas

### **Abstract**

*The current project focuses on the development of a smart rotating pizza oven, designed to optimize baking uniformity. The main objective is to implement a precise control system for temperature and rotation speed, due to the need for higher quality equipment locally and the reduction of operating costs. To carry out this project, an Arduino Mega was used to control the system, accompanied by a PID control for the speed and a K-type temperature sensor with a hysteresis control for the temperature. Tests were performed with different resistor configurations for temperature range and conservation for the analysis of the baking chamber structure. The results showed that the developed oven achieves and maintains the desired operating temperature ranges, the efficiency of the implemented controls improves the baking process, in addition to increasing production compared to traditional ovens. It is concluded that the developed rotary oven is a viable solution to improve operational efficiency in local pizzerias.*

**Keywords:** control PID, hysteresis, preservation, losses.

## Índice general

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas.....	X
Índice de planos.....	XI
<b>CAPITULO 1.....</b>	<b>1</b>
1.1    Introducción.....	2
1.2    Descripción del problema.....	2
1.3    Justificación del problema.....	3
1.4    Objetivos.....	4
1.4.1    Objetivo general.....	4
1.4.2    Objetivos específicos.....	4
1.5    Marco Teórico.....	4
1.5.1    Sistemas de control.....	4
1.5.2    Control proporcional.....	5
1.5.3    Control Integral.....	5
1.5.4    Control diferencial.....	6
1.5.5    Discretización de sistemas.....	6
1.5.6    Tipos de Horno.....	6
1.5.7    Sensores de temperatura.....	8
1.5.8    Elementos de calentamiento para hornos eléctricos.....	10
1.5.9    Estado del arte.....	12

CAPITULO 2.....	13
2.1  Metodología.....	14
2.1.1  Selección de alternativas .....	14
2.2  Proceso de diseño .....	15
2.2.1  Requerimientos de diseño .....	16
2.2.2  Diseño de estructura .....	17
2.2.3  Análisis Calefactor del entorno .....	19
2.2.4  Cálculo de Potencia Requerida .....	23
2.2.5  Elementos calefactorios.....	23
2.2.6  Diseño del sistema mecánico de rotación .....	24
2.2.7  Diseño del control de velocidad .....	28
2.2.8  Diseño del control de temperatura .....	32
2.2.9  Diagrama de programación del microcontrolador .....	33
CAPITULO 3.....	35
3.1  Resultados y análisis.....	36
3.1.1  Calor y Conservación del entorno calefactor .....	36
3.1.2  Sistema mecánico de rotación .....	41
3.1.3  Motor seleccionado .....	46
3.1.4  PID velocidad .....	47
3.1.5  Prueba de concepto del control de velocidad .....	48
3.1.6  Prueba de concepto del control de temperatura .....	50
3.1.7  Prueba de concepto de la interfaz.....	52
3.1.8  Análisis de costes .....	55
CAPITULO 4.....	57
4.1  Conclusiones y recomendaciones .....	58
4.1.1  Conclusiones .....	58
4.1.2  Recomendaciones.....	59

Referencias.....61

APÉNDICES.....63

## Abreviaturas

AISI	American Iron and Steel Institute
DCL	Diagrama de cuerpo libre
ODS	Objetivos y metas de Desarrollo Sostenible
PID	Proporcional, Integral y Derivativo
RPM	Revoluciones por minuto
RTD	Resistance Temperature Detector

## Simbología

A	Amperio
cm	Centímetros
Co <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
H	Henry
kJ	Kilo Joule
kg	Kilogramos
kgm <sup>2</sup>	Kilogramo por metro cuadrado
K	Kelvin
kW	Kilovatio
m <sup>2</sup>	Metro cuadrado
mm	Milímetros
N	Newton
Nm	Newton-metro
°C	Centígrados
Ω	Ohm
W	Vatio

## Índice de figuras

Figura 1.1 <i>Componentes de sistemas de control</i> .....	5
Figura 1.2 <i>Hornos de leña para pizza</i> .....	7
Figura 1.3 <i>Horno de gas para pizza</i> .....	8
Figura 1.4 <i>Hornos eléctricos para pizza</i> .....	8
Figura 1.5 <i>Sensor de temperatura tipo K</i> .....	9
Figura 1.6 <i>Sensor RTD Pt100</i> .....	9
Figura 1.7 <i>Resistencia calefactora tubular</i> .....	10
Figura 1.8 <i>Resistencias de cartucho</i> .....	11
Figura 1.9 <i>Resistencias de aire</i> .....	11
Figura 2.1 <i>Metodología de diseño</i> .....	16
Figura 2.2 <i>Diseño de la estructura del horno</i> .....	18
Figura 2.3 <i>Diseño de la cámara de calefacción</i> .....	18
Figura 2.4 <i>Cargas que se ejercen en los engranes</i> .....	25
Figura 2.5 <i>Diseño de engranes</i> .....	26
Figura 2.6 <i>Diagrama de cuerpo libre del eje principal</i> .....	26
Figura 2.7 <i>Diámetro mínimo del eje principal</i> .....	27
Figura 2.8 <i>Diagrama de cuerpo libre del eje secundario</i> .....	28
Figura 2.9 <i>Diámetro mínimo del eje secundario</i> .....	28
Figura 2.10 <i>Motor DC</i> .....	29
Figura 2.11 <i>Encoder Orange 400 PPR</i> .....	30
Figura 2.12 <i>Termocupla tipo K y transmisor MAX6675</i> .....	32
Figura 2.13 <i>Diagrama de flujo de la programación del microcontrolador</i> .....	34
Figura 3.1 <i>Aplicación de carga de Radiación a paredes internas del horno</i> .....	37
Figura 3.2 <i>Aplicación de carga de Radiación a pared interna de puerta del horno</i> .....	37
Figura 3.3 <i>Aplicación de carga de Conducción a paredes internas del horno</i> .....	38
Figura 3.4 <i>Aplicación de carga de Convección a pared interna de puerta del horno</i> .....	38
Figura 3.5 <i>Resultados de simulación térmica estacionaria Análisis perdidas por entorno</i> .....	39
Figura 3.6 <i>Resultados de simulación térmica estacionaria Análisis perdidas por entorno</i> .....	39
Figura 3.7 <i>Resultados de simulación térmica estacionaria Análisis Delta T superficies de la carga</i> .....	40
Figura 3.8 <i>Engranes</i> .....	41
Figura 3.9 <i>Material seleccionado para el engrane en la simulación de Inventor</i> .....	42

Figura 3.10 <i>Factores de seguridad de los engranes</i> .....	42
Figura 3.11 <i>Dimensiones del eje principal</i> .....	42
Figura 3.12 <i>Eje principal</i> .....	43
Figura 3.13 <i>Análisis de tensión eje principal</i> .....	43
Figura 3.14 <i>Dimensiones del eje secundario</i> .....	44
Figura 3.15 <i>Eje secundario</i> .....	45
Figura 3.16 <i>Análisis de tensión eje secundario</i> .....	45
Figura 3.17 <i>Respuesta al escalón del modelo del motor</i> .....	47
Figura 3.18 <i>Respuesta al escalón del sistema controlado</i> .....	48
Figura 3.19 <i>Esquema eléctrico del circuito de prueba para el control de velocidad</i> .....	49
Figura 3.20 <i>Prueba de concepto para el funcionamiento del control de velocidad</i> .....	49
Figura 3.21 <i>Respuesta del funcionamiento del control de velocidad en Arduino</i> .....	50
Figura 3.22 <i>Esquema eléctrico del circuito de prueba para el control de temperatura</i> .....	51
Figura 3.23 <i>Prueba de concepto para el funcionamiento del control de temperatura</i> .....	51
Figura 3.24 <i>Respuesta del funcionamiento del control de temperatura en Arduino</i> .....	52
Figura 3.25 <i>Pantalla del menú principal de la interfaz</i> .....	53
Figura 3.26 <i>Pantalla de la configuración de la temperatura de la interfaz</i> .....	53
Figura 3.27 <i>Pantalla de la configuración del tiempo de la interfaz</i> .....	54
Figura 3.28 <i>Pantalla de la configuración de la velocidad de la interfaz</i> .....	54
Figura 3.29 <i>Pantalla del inicio de cocción de la interfaz</i> .....	55

## Índice de tablas

Tabla 2.7 <i>Matriz de decisión</i> .....	15
Tabla 2.8 <i>Requerimientos del sistema</i> .....	16
Tabla 2.9 <i>Parámetros de ecuación de calor absorbido por las cargas</i> .....	20
Tabla 2.10 <i>Características del fabricante</i> .....	29
Tabla 3.1 <i>Calor Absorbido por las cargas</i> .....	36
Tabla 3.2 <i>Calor Perdido por el entorno</i> .....	36
Tabla 3.3 <i>Esfuerzo de fluencia de cada componente</i> .....	46
Tabla 3.4 <i>Especificaciones del motor DC</i> .....	46
Tabla 3.5 <i>Valores de las constantes del controlador PID</i> .....	47
Tabla 3.6 <i>Costos del diseño</i> .....	55
Tabla 2.1 <i>Evaluación de los criterios del horno inteligente para pizza</i> .....	64
Tabla 2.2 <i>Evaluación de criterio, precio</i> .....	64
Tabla 2.3 <i>Evaluación de criterio, compacto</i> .....	64
Tabla 2.4 <i>Evaluación de criterio, durabilidad</i> .....	64
Tabla 2.5 <i>Evaluación de criterio, fácil uso</i> .....	65
Tabla 2.6 <i>Evaluación de criterio, rango</i> .....	65

**Índice de planos**

PLANO 1	Diagrama esquemático del sistema de control
PLANO 2	Ensamble del horno
PLANO 3	Horno
PLANO 4	Soporte
PLANO 5	Soporte plataforma giratoria
PLANO 6	Brida
PLANO 7	Eje principal
PLANO 8	Eje secundario

# **CAPITULO 1**

## 1.1 Introducción

La pizza, un plato de raíces ancestrales, tiene su origen en el Mediterráneo. Las primeras formas de panes planos, cubiertos con ingredientes sencillos, eran consumidas por civilizaciones antiguas como la griega y la egipcia [1]. Sin embargo, la iteración moderna de la pizza comenzó en Nápoles (Italia) a finales del siglo XVIII, donde la introducción de tomates del Nuevo Mundo revolucionó la cocina local. La pizza napolitana, caracterizada por una masa fina y unos ingredientes minimalistas como tomate, mozzarella y albahaca, se convirtió rápidamente en un producto básico. La pizza Margarita, bautizada así en honor a la reina Margarita de Saboya en 1889, sigue siendo un ícono. Los inmigrantes italianos trajeron la pizza a Estados Unidos a finales del siglo XIX y principios del XX, donde evolucionó hacia diversos estilos regionales. Hoy en día, la pizza es un fenómeno global, que se disfruta en todo el mundo en innumerables formas y sabores [2].

La elaboración de pizzas artesanales ha sido muy popular en los últimos años por su sabor único y la experiencia gastronómica que ofrecen. Este auge ha impulsado la demanda de equipos especializados y personal altamente capacitado para lograr la calidad y autenticidad características de este producto. Sin embargo, los hornos especializados requeridos para la cocción adecuada de las pizzas artesanales suelen ser importados del extranjero, lo que implica costos elevados de adquisición y transporte para los productores locales.

El método de cocción de las pizzas artesanales requiere hornos con características específicas, como un preciso control de la temperatura, la capacidad de rotación durante ciertos intervalos de tiempo y, preferiblemente, un movimiento vertical. Estos requisitos son fundamentales para lograr la textura, el sabor y la apariencia distintivos de una pizza artesanal de alta calidad.

La adquisición de estos hornos especializados en el mercado internacional representa un desafío económico significativo para los emprendedores y pequeños productores locales, dificultando su capacidad para ofrecer productos auténticos y competir en un mercado gastronómico cada vez más exigente.

## 1.2 Descripción del problema

La cocción de pizzas artesanales requiere el uso de un horno que no solo se encargue del control preciso de la temperatura, sino que también mantenga una cierta velocidad de rotación durante ciertos intervalos de tiempo para una cocción uniforme y que preferiblemente permita un desplazamiento vertical que facilite el insertar y retirar las pizzas de este. Actualmente, estos

hornos especializados se pueden conseguir en el mercado internacional, pero su adquisición e importación al país resulta sumamente costosa.

### **1.3 Justificación del problema**

Fomentar el crecimiento de la industria local de pizzas artesanales en Ecuador es un desafío significativo para los productores locales, quienes se enfrentan a varios obstáculos que dificultan su competitividad en el mercado. Uno de los principales retos es el costo inicial elevado asociado con la adquisición de hornos especializados y de alta calidad los cuales pueden costar entre \$10.000 y \$30.000 [3]. Además, muchos de estos hornos requieren un espacio considerable para su instalación, lo cual puede ser un problema para los negocios con espacios limitados.

Otro obstáculo importante es el alto consumo de energía de los hornos convencionales, lo que resulta en costos operativos elevados y una mayor huella de carbono. Asimismo, el mantenimiento y las reparaciones frecuentes de estos equipos pueden representar una carga financiera adicional para los pequeños productores.

Resolver esta problemática a través del diseño de un horno inteligente para pizzas artesanales impulsará la innovación tecnológica y el desarrollo de soluciones adaptadas a las necesidades específicas del mercado nacional. Esto evitará que los negocios locales reduzcan su rentabilidad y viabilidad debido a la dificultad de competir con grandes cadenas y establecimientos industrializados.

Los resultados de este proyecto contribuirán al conocimiento existente en diversas áreas clave. En primer lugar, se avanzará en la aplicación de sistemas de control y monitoreo inteligentes para lograr una cocción precisa y consistente. Esto garantizará una calidad superior y una mayor uniformidad en los productos finales. Además, el diseño incorporará sistemas de calefacción para reducir el consumo de energía. Esto no solo disminuirá los costos operativos para los productores, sino que también promoverá prácticas sostenibles y amigables con el medio ambiente.

Finalmente, el proyecto abordará el desarrollo de un diseño compacto y portátil para el horno inteligente, lo que facilitará su transporte e instalación en diversos entornos. Esto brindará a los emprendedores locales una mayor flexibilidad y oportunidades para participar en eventos gastronómicos, ferias locales y otros espacios de venta al público lo cual permite expandirse en el mercado local e incrementar su facturación mensual al aumentar las ventas [4].

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Diseñar un horno rotatorio inteligente utilizando un microcontrolador para el control y monitoreo del proceso de cocción de pizzas artesanales.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

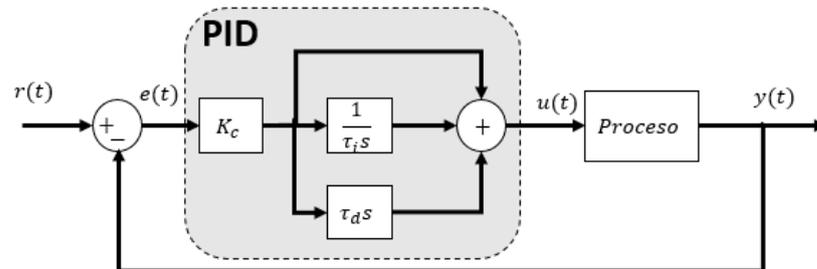
1. Desarrollar un controlador de histéresis de temperatura para el sistema de calentamiento del horno.
2. Desarrollar un controlador PID de velocidad para la plataforma giratoria.
3. Desarrollar un temporizador para la cocción uniforme de las pizzas.
4. Desarrollar una interfaz para la visualización y parametrización del proceso.
5. Implementar un prototipo de baja resolución para validar el diseño del equipo.

## **1.5 Marco Teórico**

### **1.5.1 Sistemas de control**

Un sistema de control está compuesto de los siguientes elementos en los cuales en base a la señal de entrada que reciben realizan una acción para regular el comportamiento del proceso [5]. Los componentes principales son:

- Planta: Sistema que se desea controlar
- Variable a controlar: Variable que se monitorea por medio de un transductor para compararla con el valor a alcanzar
- Variable por manipular: El sistema actúa sobre esta variable para provocar cambios en el estado de la planta

**Figura 1.1***Componentes de sistemas de control*

Es un algoritmo de control retroalimentado que calcula el error entre el valor objetivo y el valor de la variable a controlar, y en función de este error poder enviar una señal de control para reducir dicho error [6]. La ecuación del control PID es la siguiente:

$$c(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1.1)$$

### 1.5.2 Control proporcional

Produce una salida de control que es proporcional a la señal del error. Mientras mayor sea la ganancia proporcional, mayor será la acción de control y más rápida será la respuesta del sistema, pero excesiva ganancia puede causar inestabilidad. La función de transferencia del control proporcional es:

$$G_C(s) = K_p \quad (1.2)$$

Sólo con un control proporcional no siempre se elimina todo el error, el error que persiste se denomina offset.

### 1.5.3 Control Integral

El control integral es la suma de todos los errores en cada instante de tiempo el cual tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario. La función de transferencia del control integral es:

$$G_C(s) = \frac{K_i}{s} \quad (1.3)$$

Al combinarla con el control proporcional se acelera la respuesta del sistema y elimina el offset mencionado anteriormente. Por otro lado, puede crear oscilaciones alrededor del valor objetivo por la suma acumulada.

#### 1.5.4 Control diferencial

Calcula la derivada con respecto al tiempo del error y multiplica este error por la ganancia derivativa. La función de transferencia del control derivativo es:

$$G_C(s) = K_d s \quad (1.4)$$

Esta acción ralentiza al regulador y cuanto menor es el error, es aún más lento.

#### 1.5.5 Discretización de sistemas

La discretización es el proceso de convertir un sistema de control continuo en uno discreto en el tiempo, lo cual es necesario al implementarlo en un controlador digital. Se obtiene discretizando la ecuación en tiempo continuo aproximando el término integral por medio de la suma trapezoidal y el término derivativo con la diferencia de dos puntos [7].

$$\int e(t) dt = \sum \left[ \frac{e(k) + e(k-1)}{2} \right] T_s \quad (1.5)$$

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (1.6)$$

Discretizando se obtiene la siguiente ecuación en diferencias:

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (1.7)$$

#### 1.5.6 Tipos de Horno

En la industria alimenticia los hornos son una parte muy importante en la elaboración de alimentos, especialmente en la industria de la pizza, en la cual la calidad del producto final va a depender en gran medida del proceso de cocción y el tipo de horno usado para esto. Hay una

variedad en lo que respecta a hornos para pizza: a gas, de leña o eléctricos, cada uno con sus respectivas características que impactan tanto en el sabor del producto final como en las condiciones de trabajo y eficiencia energética. En el marco de los ODS 7 y 8, los cuales promueven la energía asequible y no contaminante y el trabajo decente y crecimiento económico respectivamente, es importante considerar estas opciones con detenimiento. Los hornos de gas ofrecen una solución intermedia en términos de eficiencia y control, pero aun así implican el uso de combustibles fósiles. Por otro lado, los hornos eléctricos son una opción adecuada y cada vez más elegida para un entorno de trabajo sostenible, puesto que optimizan el uso energético, reducen las emisiones y mejoran la seguridad laboral. A continuación, se detallan las características de los hornos ya mencionados.

#### **1.5.6.1 Hornos de leña**

Los hornos de leña son una opción tradicional, sin embargo, su consumo económico de coste inicial es elevado debido a la construcción y materiales necesarios, y el coste operativo varía dependiendo de la leña [8]. La huella de carbono es considerablemente alta dado que la combustión de la leña libera una cantidad de  $CO_2$  y otros contaminantes. Además, estos hornos requieren de un espacio considerable, tanto para su instalación como para el almacenamiento de la leña.

### **Figura 1.2**

*Hornos de leña para pizza*



#### **1.5.6.2 Hornos de gas**

Los hornos de gas presentan un coste inicial moderado a alto, pero un coste operativo bajo debido al precio del gas. La huella de carbono es menor que las de los hornos de leña, pero sigue siendo significativa por la combustión del gas. En términos de espacio son más compactos, pero necesitan un área adecuada para el almacenamiento del gas [9].

**Figura 1.3**

*Horno de gas para pizza*



### **1.5.6.3 Hornos eléctricos**

Los hornos eléctricos cuentan con un consumo energético que varía de moderado a alto dependiendo del modelo y el coste operativo es moderado según la eficiencia del horno y las tarifas eléctricas locales [10]. En general, estos hornos tienen una huella de carbono menor que los hornos de leña y de gas.

**Figura 1.4**

*Hornos eléctricos para pizza*



### **1.5.7 Sensores de temperatura**

Existen varios tipos de sensores de temperatura utilizados en aplicaciones industriales. A continuación, se describen tres de los más comunes: la termocupla tipo K y el sensor RTD Pt100.

### 1.5.7.1 Termocupla Tipo K

Este tipo de sensor consta de un amplio rango de temperatura, va de  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $1,260\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Entre sus ventajas se pueden destacar su robustez, bajo costo y rápida respuesta a los cambios de temperatura [11]. Sin embargo, son menos precisos que otros tipos de sensores y pueden ser susceptibles a interferencias electromagnéticas. Las termocuplas tipo K se usan en hornos de alta temperatura, procesos industriales, y en motores y turbinas.

#### Figura 1.5

*Sensor de temperatura tipo K*



### 1.5.7.2 Sensor RTD Pt100

Son sensores de resistencia que utilizan platino y tienen una resistencia de 100 ohmios a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La resistencia de estos sensores cambia de manera predecible con la temperatura, lo que permite medir la temperatura con alta precisión. Su rango de temperatura abarca desde  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Los RTD Pt100 ofrecen alta precisión y estabilidad, buena repetibilidad, y una linealidad en el cambio de resistencia con la temperatura [12]. No obstante, son más caros que las termocuplas y tienen una respuesta más lenta a los cambios de temperatura.

#### Figura 1.6

*Sensor RTD Pt100*



### 1.5.8 Elementos de calentamiento para hornos eléctricos

Los elementos comúnmente usados para la generación de calor en este tipo de hornos son las resistencias calefactoras, las cuales son:

#### 1.5.8.1 Resistencias calefactoras de tubo

Son resistencias tubulares que se pueden moldear para ajustarse a diversas formas, tienen una temperatura de calentamiento de hasta 800°C, ofrecen un tiempo de permanencia prolongado lo cual son la mejor opción para aplicaciones donde se requiere mantener temperaturas constantes. Además, su velocidad de calentamiento es alta lo que permite alcanzar la temperatura deseada en un tiempo corto.

#### Figura 1.7

*Resistencia calefactora tubular*



#### 1.5.8.2 Resistencias de cartucho

Las resistencias de cartucho son elementos calefactores compactos diseñados para aplicaciones que requieren una alta densidad de potencia, permitiendo un calentamiento rápido y eficiente, lo que implica un consumo energético alto-moderado. Estas resistencias son ideales para espacios limitados y se utilizan comúnmente en moldes, planchas, equipos de embalaje y maquinaria industrial donde se necesita un calentamiento localizado y preciso. Fabricadas con materiales de alta calidad como acero inoxidable y aleaciones de níquel-cromo, ofrecen durabilidad y resistencia a la oxidación. Su construcción robusta permite una transferencia de calor uniforme y estable.

**Figura 1.8**

*Resistencias de cartucho*



### **1.5.8.3 Resistencias de aire**

Las resistencias de aire, diseñadas con aspas circulares, rectangulares o helicoidales y operando con un sistema de aire forzado, mantienen la temperatura del aire cercana a la del elemento calefactor, asegurando una distribución uniforme del calor. Estas resistencias son ideales para hornos de convección, secadores industriales y sistemas de calefacción de aire forzado, gracias a su capacidad para mejorar la transferencia de calor y maximizar la eficiencia térmica.

**Figura 1.9**

*Resistencias de aire*



### 1.5.9 Estado del arte

Investigando en diferentes repositorios universitarios, se encontraron varios trabajos similares al presente estudio, de los cuales mencionamos a continuación los más relevantes:

En un proyecto de grado de la Universidad Ricardo Palma, Perú, se puede observar el diseño e implementación de un prototipo de un horno para el secado automatizado de granos de maíz. Este prototipo cuenta con un controlador PID para regular la temperatura dentro de la cámara de secado con la programación de un software para el control y monitoreo del proceso, reduciendo así la dependencia del operador [13].

En otro proyecto de grado perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia, España, cuyo tema es el diseño e implementación de un sistema de control para motores DC haciendo uso de un Arduino. Este trabajo tiene como objetivo diseñar e implementar un sistema de control que regula la velocidad de rotación y el ángulo de giro del motor con Arduino junto a una interfaz para la comunicación con el usuario aportando a la investigación en el área de automatización de procesos. El sistema cuenta con dos controladores PID digitales obtenidos por medio de los métodos de Ziegler-Nichols para los parámetros de sintonización. Además, se resalta la importancia de discretizar los sistemas debido a que un microcontrolador solo es capaz de procesar valores discretos y finitos [14].

De lo recopilado en estas investigaciones se estima que los controladores clásicos P, PI y PID son ampliamente utilizados en sistemas de control debido a su efectividad permitiendo regular variables críticas en procesos industriales como la temperatura, velocidad y la posición, con lo que se logra un desempeño óptimo del sistema con un ajuste adecuado de sus parámetros.

## **CAPITULO 2**

## 2.1 Metodología

Esta sección describe los procedimientos metodológicos usados para la selección y diseño de la solución óptima para la problemática presentada previamente. Tras una revisión de la literatura y hornos para pizza existentes en el mercado se generaron diversas conceptualizaciones de diseño. Posterior a aquello, se formularon y presentaron tres alternativas de solución.

### 2.1.1 Selección de alternativas

Las alternativas de solución fueron determinadas mediante un proceso de análisis, que incluyó la observación directa de hornos disponibles en el mercado actual, así como la consideración detallada de los hallazgos obtenidos a través de la investigación primaria y secundaria realizada. Este enfoque permitió identificar las características más relevantes y las necesidades proporcionando una base sólida para la formulación de opciones viables.

**2.1.1.1 Solución A.** Diseño de un horno inteligente para pizzas artesanales a gas con controladores PI para la temperatura y velocidad de rotación.

**2.1.1.2 Solución B.** Diseño de un horno inteligente para pizzas artesanales eléctrico con control PID para velocidad de rotación y control por histéresis para la temperatura.

**2.1.1.3 Solución C.** Diseño de un horno inteligente para pizzas artesanales a gas con el uso de un variador de frecuencia para el control de la velocidad de rotación y un controlador PID para la temperatura.

Una vez planteadas las alternativas de solución se establecieron los criterios de diseño a considerar para seleccionar la alternativa adecuada. Los criterios que fueron escogidos son los siguientes:

- 1) **Precio:** debe ser económicamente accesible tanto en su costo inicial de compra como en sus costos operativos.
- 2) **Compacto:** que permita su instalación en espacios reducidos, típicos de negocios de comida.
- 3) **Durabilidad:** debe estar construido con materiales y componentes que garanticen una larga vida útil.

- 4) **Fácil uso:** debe ser intuitivo y fácil de usar, permitiendo que cualquier persona, independientemente de su experiencia culinaria pueda operar el horno.
- 5) **Rango:** debe ofrecer un amplio rango de temperaturas y tiempos de cocción para permitir la preparación de diferentes estilos de pizza.

Las *Tablas 2.1 – 2.6* se encuentran en el Apéndice A. Con los criterios establecidos, se procedió a determinar la ponderación relativa de cada uno de ellos como se muestra en la *Tabla 2.1*. Después de evaluar cada uno de los criterios en las tres soluciones propuestas, se determina el desempeño individual de cada una. Las *Tablas 2.2 – 2.6* muestran la ponderación de cada solución según cada criterio. Con esta información y los pesos de los criterios establecidos en la *Tabla 2.7*, se puede determinar la prioridad de cada solución.

**Tabla 2.7**

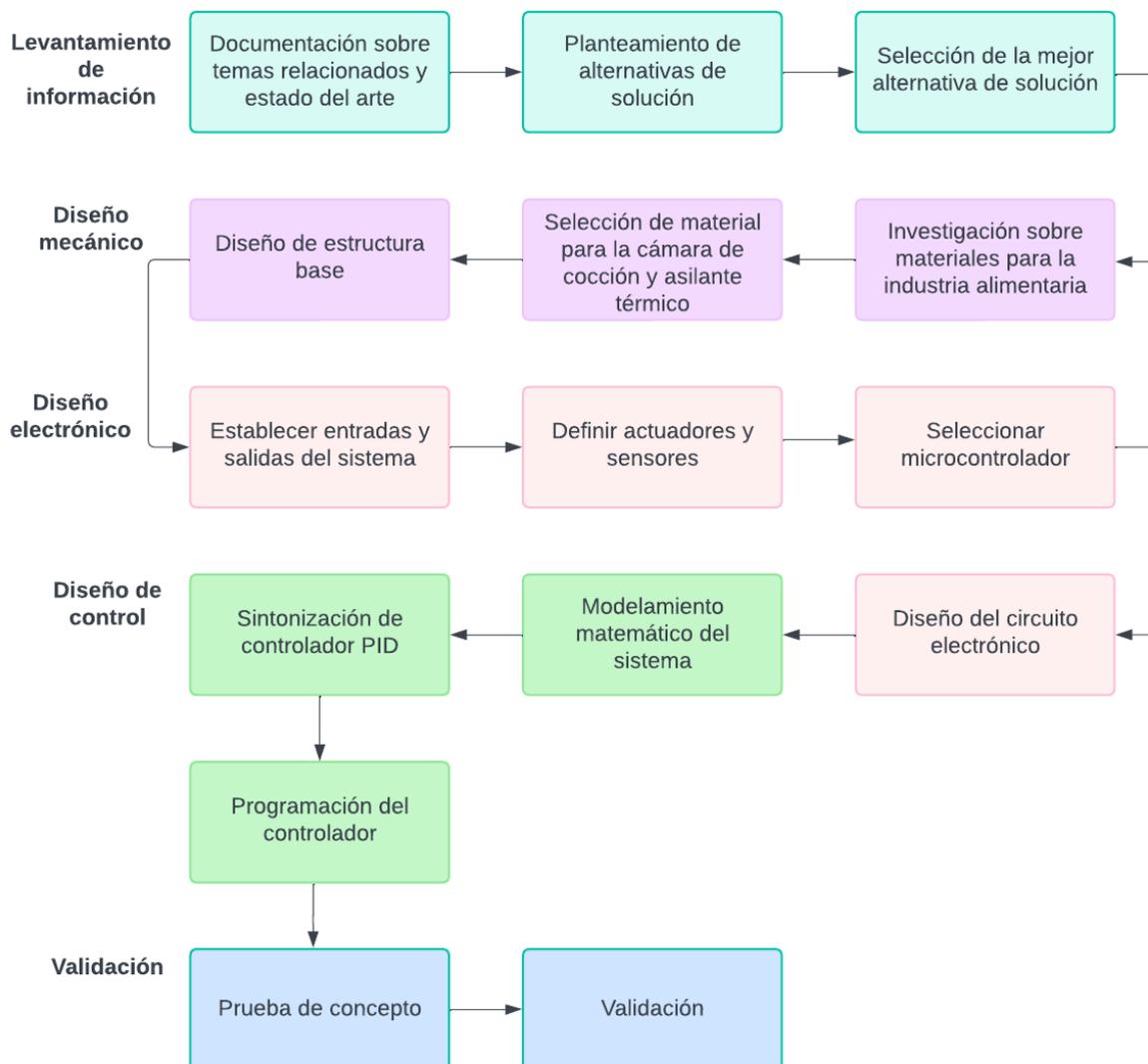
*Matriz de decisión*

Alternativas	Criterios					Resultados	
	Precio	Compacto	Durabilidad	Fácil uso	Rango	$\Sigma$	Prioridad
A	0.097	0.042	0.100	0.017	0.083	0.339	2
B	0.097	0.083	0.067	0.033	0.083	0.364	1
C	0.039	0.042	0.033	0.017	0.167	0.297	3

La *Tabla 2.7* presenta una matriz de decisión que permitió concluir que la solución B del diseño de un horno inteligente para pizzas artesanales eléctrico con control PID para velocidad de rotación y control por histéresis para la temperatura era la mejor opción.

## 2.2 Proceso de diseño

Una vez seleccionada la mejor alternativa de solución, se procedió a establecer el mapa conceptual de la *Figura 2.1*, detallando cada una de las etapas de diseño necesarias para cumplir con el objetivo planteado.

**Figura 2.1***Metodología de diseño***2.2.1 Requerimientos de diseño**

El primer paso en el diseño del horno consistió en identificar los requisitos que la solución final debía satisfacer donde se determinaron los siguientes criterios, resumidos en la *Tabla 2.8*:

**Tabla 2.8***Requerimientos del sistema*

Costo	El diseño del horno no debe superar los \$25000 – \$30000, lo cual es el precio de venta de los modelos en el mercado internacional.
-------	--

Rango temperatura	de	El horno debe alcanzar temperaturas entre 400°C – 500°C.
Opciones velocidad	de	La plataforma va a tener 2 opciones de velocidad de rotación: 6 y 8 RPM
Control velocidad	de	La plataforma giratoria que sostiene la pizza debe permitir un control y ajuste de su velocidad.
Control temperatura	de	El horno debe ser capaz de alcanzar y mantener temperaturas precisas.
Interfaz usuario	de	El horno debe incluir una interfaz amigable, preferiblemente con una pantalla LCD, que permita configurar fácilmente los parámetros de cocción.

### 2.2.2 Diseño de estructura

En esta sección se procedió con el diseño general del horno rotatorio, para lo cual se dividió el análisis en las siguientes secciones:

- Estructura
- Cámara de calefacción

#### 2.2.2.1 Estructura

La estructura elegida fue un horno de cúpula, diseñado específicamente para la preparación de pizzas. Este tipo de horno destaca por su capacidad para mantener un ambiente de calor constante y uniforme, crucial para la cocción rápida y adecuada de la pizza. La forma abovedada no solo retiene eficazmente el aire caliente, sino que también distribuye el calor de manera homogénea, asegurando resultados óptimos tanto en entornos profesionales como domésticos. Esta configuración permite lograr la textura y cocción perfectas que caracterizan a una auténtica pizza.

**Figura 2.2**

*Diseño de la estructura del horno*



### **2.2.2.2 Cámara de Calefacción**

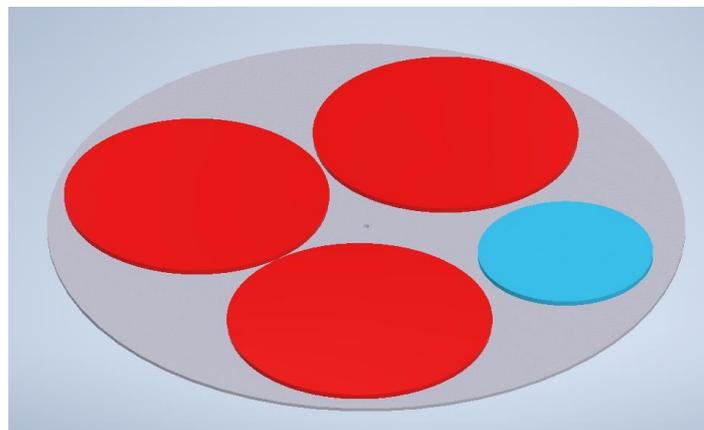
Para el dimensionamiento de la cámara interna del horno (cámara de calefacción), el factor primordial considerado fue la capacidad de carga que esta debe soportar. Dicha carga está representada principalmente por la dimensión de la plataforma rotatoria en la cual irán ubicadas las pizzas. El dimensionamiento del horno se lo ha hecho visualizando una capacidad de cocción de tres pizzas de tamaño familiar y una pizza de tamaño mediano a la vez.

Una vez tomado en cuenta eso se estableció que las dimensiones de la plataforma rotatoria son:

- Diámetro=1200 mm

**Figura 2.3**

*Diseño de la cámara de calefacción*



### 2.2.3 Análisis Calefactor del entorno

Para el análisis calefactor del entorno de cocción, se hizo uso de la primera ley de la termodinámica para determinar los flujos de calor que interactúan en el entorno calefactor del horno, obteniendo así la ecuación (2.1).

El sistema modelado incluyó varios componentes clave:

- **Cavidad del horno:** espacio interno donde se hornean las pizzas
- **Elemento calefactor:** resistencias eléctricas que proporcionan calor
- **Material de paredes:** En este caso Ladrillo Refractario
- **Carga:** En este caso las pizzas que son la carga térmica para hornear

$$Q_{resistencia} = Q_{pizza} + Q_p + Q_{entorno} \quad (2.1)$$

Debido a que el sistema a analizar es un sistema transitorio se presenta esta ecuación en su forma diferencial:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_{resistencia}}{dt} - \left( \frac{dQ_{pizza}}{dt} + \frac{dQ_p}{dt} + \frac{dQ_{almacenado}}{dt} \right) \quad (2.2)$$

Donde:

$$\frac{dQ}{dt} = \text{cambio de energía térmica del sistema respecto al tiempo}$$

$$\frac{dQ_{resistencia}}{dt} = \text{Potencia dada por las resistencias calefactoras del sistema (W)}$$

$$\frac{dQ_{pizza}}{dt} = \text{Calor absorbido por las pizzas}$$

$$\frac{dQ_p}{dt} = \text{Calor perdido por el entorno}$$

$$\frac{dQ_{almacenado}}{dt} = \text{Calor almacenado en los componentes del horno}$$

#### 2.2.3.1 Calor absorbido por las cargas (pizzas)

Se estableció que el calor que las cargas van a absorber durante el proceso de horneado se lo calcula tomando en cuenta:

- $Q_{sensible} = \text{Calor necesario para elevar la } T \text{ de la pizza a la } T \text{ deseada}$

$$Q_{sensible} = m_{pizza} c_{pizza} + \frac{dT_{pizza}}{dt} \quad (2.3)$$

- $Q_{evaporacion}$ =Calor necesario para evaporar el agua contenida en las pizzas

$$Q_{evap} = m_{agua} * \Delta H_{vap} * \frac{dm_{agua}}{dt} \quad (2.4)$$

- $Q_{conv}$ =Calor transferido por el aire caliente de la cavidad de cocción

$$Q_{conv} = h_{conv} * A_{pizza} * (T_{horno} - T_{pizza}) \quad (2.5)$$

- $Q_{rad}$ =Calor transferido desde elementos calefactores a la pizza

$$Q_{rad} = \epsilon * \sigma * (T_{horno}^4 - T_{pizza}^4) \quad (2.6)$$

Por lo cual al tomar en cuenta las ecuaciones presentadas en esta sección se obtiene:

$$Q_C = m_{pizzas} * c_p * \frac{dT_{pizza}}{dt} + m_{agua} * \Delta H_{vap} * \frac{dm_{agua}}{dt} + h_{conv} * A_{pizza} * (T_{horno} - T_{pizza}) + \epsilon * \sigma * (T_{horno}^4 - T_{pizza}^4) \quad (2.7)$$

Donde:

**Tabla 2.9**

*Parámetros de ecuación de calor absorbido por las cargas*

Símbolo	Parámetro	U
$m_{pizzas}$	Masa carga (pizza)	kg
$c_p$	Capacidad calorífica	$\frac{kJ}{kg^{\circ}C}$
$\Delta H_{vap}$	Calor latente de vaporización del agua	$\frac{kJ}{kg}$
$h_{conv}$	Coeficiente de transferencia de calor por convección	$\frac{W}{m^2^{\circ}C}$
$A_{pizza}$	Área superficial de la pizza	m <sup>2</sup>
$\epsilon$	Emisividad de las pizzas	
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	$\frac{W}{m^2 K^4}$

### 2.2.3.2 Cálculo de las pérdidas de calor por las paredes del sistema (Entorno)

$$Q_{p-total} = Q_k + Q_{cv} + Q_r \quad (2.8)$$

Donde:

$Q_{p-total}$  = Pérdidas de calor

$Q_k$  = Pérdidas generadas por Conducción

$Q_{cv}$  = Pérdidas generadas por convección

$Q_r$  = Pérdidas por radiación

Las pérdidas de conducción se dan debido al flujo de calor a través de los materiales del horno (ladrillo refractario) desde el interior caliente del horno hacia el ambiente exterior más frío. Este fenómeno ocurre debido a la diferencia de temperatura entre el interior del horno y su entorno, y se rige por las leyes de la transferencia de calor. Para determinar estas se hace uso de la ecuación de Fourier.

$$Q_k = \frac{k_{aislante} * A * \Delta T}{d} \quad (2.9)$$

Donde:

$Q_k$  = Pérdida de calor (W)

$k_{aislante}$  = Conductividad térmica del material (Ladrillo refractario  $\frac{W}{mK}$ )

$A$  = Área de la superficie a través de la cual se pierdo calor  $m^2$

$\Delta T$  = Diferencia de  $T$  interior y exterior del horno

$d$  = Espesor del aislante 0.04 m

Cabe recalcar que esta fórmula se centra únicamente en el material principal de las paredes (ladrillo refractario). Debido a que en el diseño no se está considerando el uso de un aislante adicional puesto que la conductividad térmica de los ladrillos refractarios es baja.

Las pérdidas por convección se dan debido al movimiento del aire alrededor del horno. Este tipo de pérdida ocurre principalmente en la superficie externa del horno donde el aire en contacto con la superficie se calienta y se desplaza, siendo reemplazado por aire más frío. Para calcularlas se hace uso de la Ecuación 2.7 que está basada en la ley de enfriamiento de Newton.

$$Q_{cv} = h * A * \Delta T \quad (2.10)$$

Donde:

$Q_{cv}$  = Tasa de transferencia de calor por convección (W)

$h$  = coeficiente de transferencia de calor por convección  $\frac{W}{m^2 K}$

$A$  = Área de la superficie donde se da la transferencia de calor  $m^2$

$\Delta T$  = Diferencia de  $T$  entre la superficie y el fluido circundante  $K$

Para el coeficiente de transferencia de calor por convección, se utilizó un valor típico para aire en condiciones naturales y para superficies verticales, cuyo rango va de 10 a 30 W/m<sup>2</sup>·K.

Las pérdidas por radiación se dan por la transferencia de calor en forma de ondas electromagnéticas. Esta tasa de transferencia de calor por radiación entre una superficie y su entorno se calculó haciendo uso de la ley de Stefan-Boltzmann:

$$Q_r = \epsilon * \sigma * A * (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (2.11)$$

$\epsilon$  = emisividad del material (sin unidad, entre 0 y 1 en este caso aprox. 0.85)

$\sigma$  = constante de Stefan – Boltzman ( $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{K^4 m^2}$ )

$A$  = Área de la superficie  $m^2$

$T_s$  =  $T$  de la superficie  $K$

$T_{amb}$  =  $T$  del ambiente  $K$

### 2.2.3.3 Calor almacenado por los componentes del horno

El calor que se almacena en los componentes del horno fue calculado considerando la masa y la capacidad calorífica específica de los materiales que conforman el horno (paredes, plataforma rotatoria, etc.). El cual fue calculado haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$Q_{alm} = m_{comp} * c_{p-comp} * \frac{dT_{comp}}{dt} \quad (2.12)$$

En la sección 2.2.3 se presentaron las ecuaciones diferenciales que describen el balance térmico transitorio del horno eléctrico de pizza, considerando los mecanismos de transferencia de calor por convección, radiación y conducción. Para facilitar el análisis y evitar la resolución manual de las ecuaciones diferenciales mediante métodos numéricos, se optó por utilizar una simulación en software especializado en análisis de transferencia de calor cuyos resultados serán presentados en el siguiente capítulo.

#### 2.2.4 Cálculo de Potencia Requerida

Una vez realizados los cálculos de calor en la sección anterior se procedió con el cálculo de la potencia requerida para elevar la temperatura del horno y cargas a la temperatura deseada (incluyendo pérdidas de calor).

$$P_{total} = \frac{Q_{total}}{t} \quad (2.13)$$

Donde:

$Q_{total}$  = Capacidad calorífica total ajustada por las pérdidas de calor

$t$  = tiempo en segundos para alcanzar la temperatura deseada

Con esta ecuación se obtiene la potencia requerida por el horno y las cargas para llegar a la temperatura deseada en un tiempo determinado. Este cálculo da una base para el dimensionamiento de los elementos calefactorios necesarios.

#### 2.2.5 Elementos calefactorios

Para determinar los elementos calefactorios necesarios para el horno de cúpula se consideraron:

- Potencia total requerida
- Selección de Resistencia calefactora
- Distribución

La potencia total requerida se la obtiene con las ecuaciones plasmadas en la sección anterior, respecto a la selección de resistencias calefactoras se toma en cuenta la disponibilidad en el mercado y la potencia de cada una de ellas puesto que se hace uso de la *Ecuación 2.13* para determinar el número de resistencias necesarias para satisfacer la potencia total requerida.

$$\text{Numero de Resistencia} = \frac{\text{Potencia}_{total\ Requerida}}{\text{Potencia}_{de\ cada\ resistencia}} \quad (2.14)$$

Para una distribución uniforme del calor generado por las resistencias es necesario:

- Ubicar las resistencias de manera equidistantes alrededor de la cúpula y base del horno.
- Hay que asegurar que la instalación de paso a una cobertura homogénea del área de cocción.

### 2.2.6 Diseño del sistema mecánico de rotación

Para el diseño, se determinó la necesidad de un sistema de transmisión de potencia mediante engranajes, debido a las consideraciones de temperatura del sistema y las bajas velocidades de operación. El sistema debe transmitir 100 W y 30 Nm de torque de entrada proporcionados por el motor.

#### 2.2.6.1 Diseño de base del soporte y plataforma giratoria

Se diseñó una plataforma giratoria de cerámica refractaria de 50 mm de espesor con una base de hierro fundido de 125 cm. Mediante Inventor Professional, se calculó que la masa de la plataforma es de 68 kg, la del soporte de 27 kg, y el momento de inercia total del sistema es de 14.81 kgm<sup>2</sup>.

$$\omega = RPM \times \frac{2\pi}{60} \quad (2.15)$$

$$\alpha = \frac{\omega}{t} \quad (2.16)$$

$$\tau = I \cdot \alpha \quad (2.17)$$

El cálculo del torque necesario para transmitir al eje secundario que mueve la plataforma se realizó considerando la máxima velocidad de 8 RPM, garantizando que el motor pueda manejar la carga más exigente. Utilizando la *Ecuación 2.17*, se obtuvo un torque de 12.41 Nm con un tiempo de aceleración de 1 segundo.

$$Fa = m \cdot g \quad (2.18)$$

Se determinó, a través de la *Ecuación 2.18*, la fuerza axial  $F_a$  generada en el eje secundario, considerando la masa de la plataforma, el soporte, y la carga máxima de las pizzas (6 kg) el cual es de 990.81 N.

### 2.2.6.2 Diseño de engranes

Se diseñaron engranajes cónicos a 90 grados con una relación de 4:1 y un ángulo de presión de 20 grados. Considerando que el torque necesario para mover la plataforma es el torque en el eje secundario, se calculó que el torque requerido en el eje principal es de al menos 3.1 Nm.

$$P = \tau \cdot \omega \quad (2.19)$$

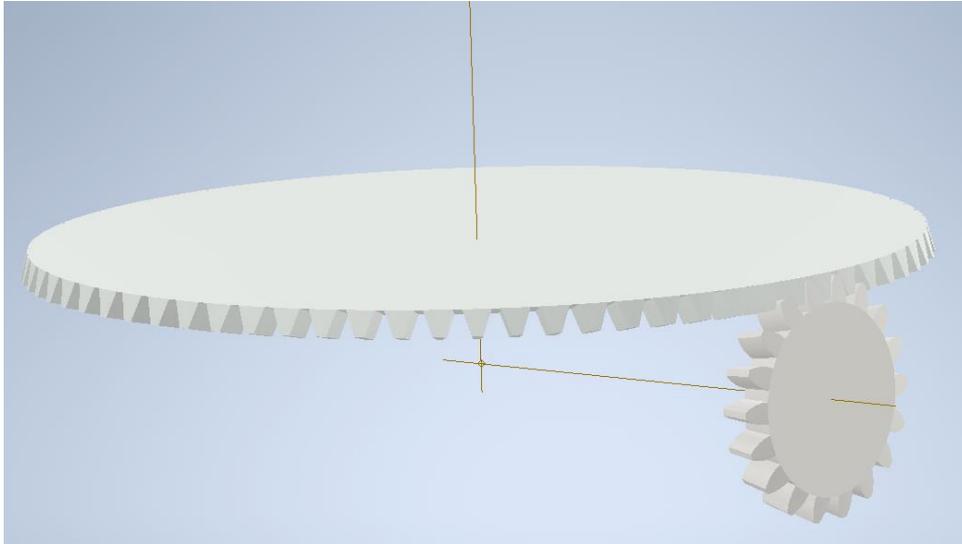
Basado en el torque necesario, se seleccionó el motor M1135244, que opera a bajas velocidades con un torque nominal de 32 Nm. Con esta información, se utilizó el Design Accelerator de Inventor Professional para diseñar el engranaje, considerando el torque generado por el motor y la velocidad deseada del sistema. Como resultado, se obtuvo una fuerza radial de 261.967 N ejercida en el eje principal y 65.492 en el eje secundario, como se muestra en la *Figura 2.4*.

### Figura 2.4

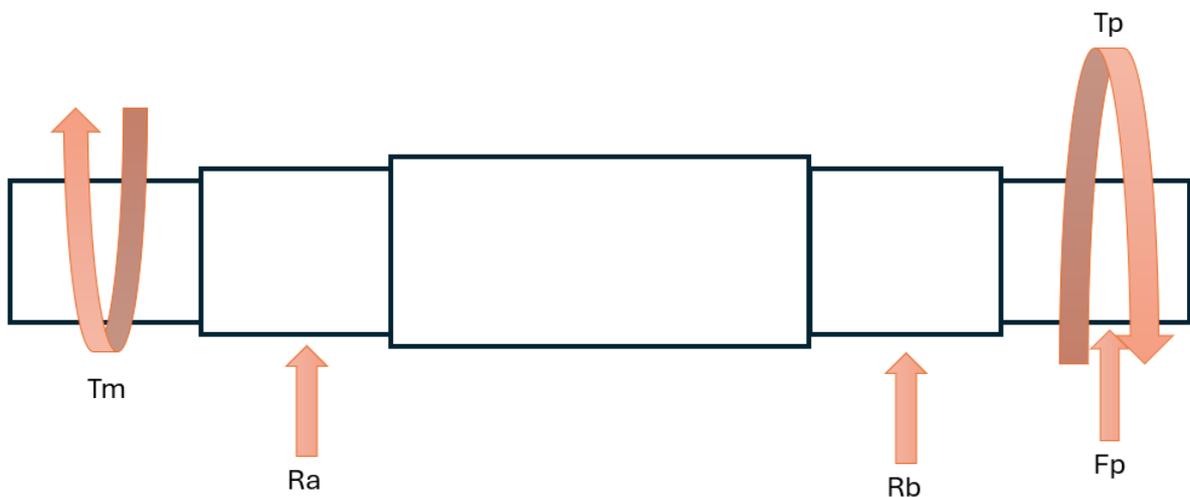
*Cargas que se ejercen en los engranes*

#### ▣ Cargas

		Engranaje 1	Engranaje 2
Potencia	P	0.141 kW	0.138 kW
Velocidad	n	42.00 rpm	10.50 rpm
Par de torsión	T	32.000 N m	125.440 N m
Eficiencia	$\eta$	0.980 su	
Fuerza tangencial	$F_t$	741.900 N	
Fuerza normal	$F_n$	789.514 N	
Fuerza radial (dirección 1)	$F_{r1}$	261.967 N	65.492 N
Fuerza radial (dirección 2)	$F_{r2}$	261.967 N	65.492 N
Fuerza axial (dirección 1)	$F_{a1}$	65.492 N	261.967 N
Fuerza axial (dirección 2)	$F_{a2}$	65.492 N	261.967 N
Velocidad circunferencial	v	0.190 mps	
Velocidad de resonancia	$\eta_{E1}$	15793.292 rpm	

**Figura 2.5***Diseño de engranes***2.2.6.3 Eje principal**

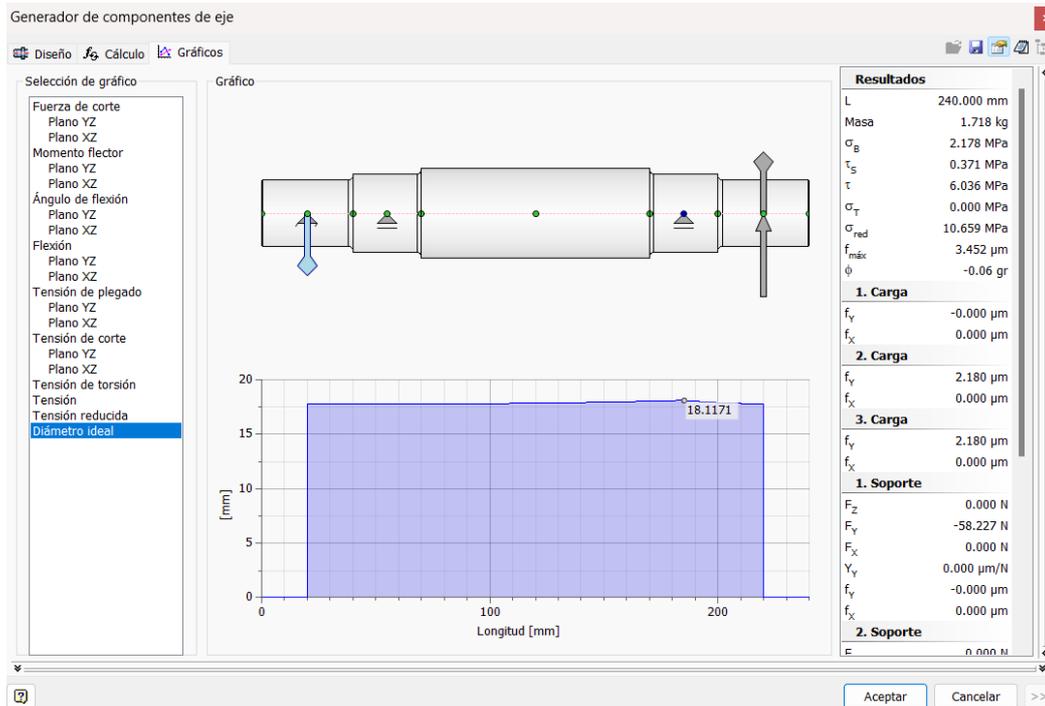
El eje principal tiene cuatro puntos de interés: el extremo que se acopla con el motor, la sección con los dos rodamientos, y la sección donde se encuentra el piñón. Fue necesario analizar las cargas previamente calculadas para determinar el diámetro mínimo requerido para soportar las condiciones de trabajo. Se utilizó el torque máximo del sistema de 32 Nm, la carga que ejerce del piñón y las reacciones de los rodamientos.

**Figura 2.6***Diagrama de cuerpo libre del eje principal*

Con este diseño mediante el software de Inventor con el cálculo del generador de componentes se obtuvo el diámetro mínimo de cada sección.

**Figura 2.7**

*Diámetro mínimo del eje principal*

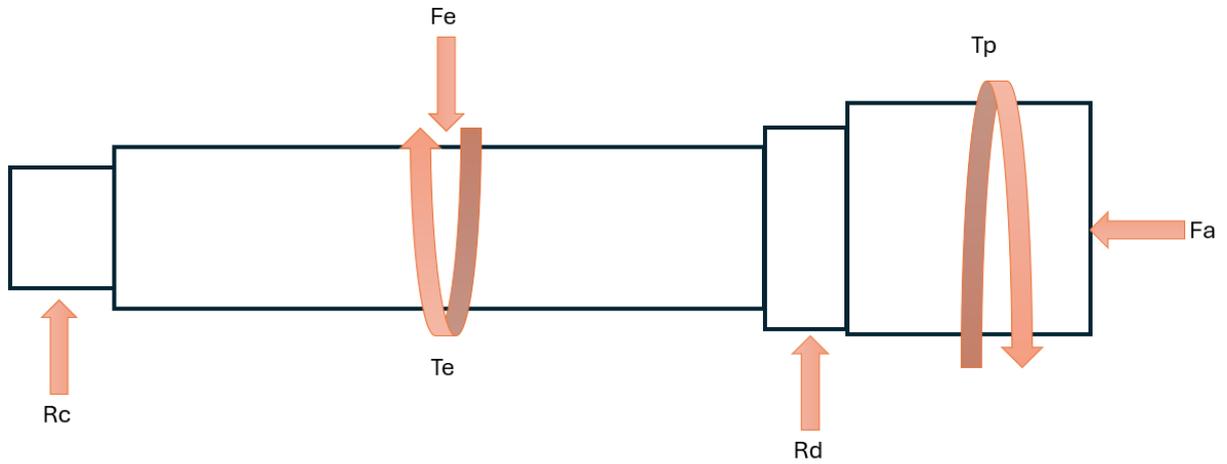


#### 2.2.6.4 Eje secundario

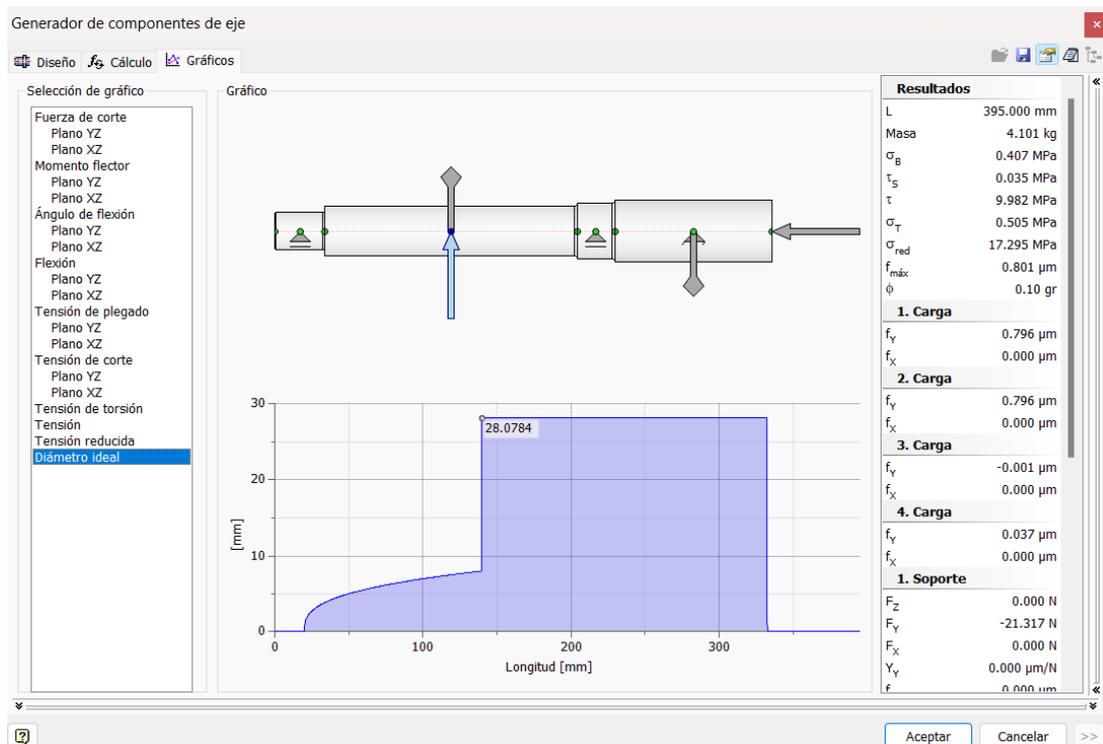
De la misma forma que el eje principal se desarrolla el DCL y para calcular el diámetro mínimo, se consideró la unión con el soporte como una reacción fija junto a las reacciones de los rodamientos.

**Figura 2.8**

Diagrama de cuerpo libre del eje secundario

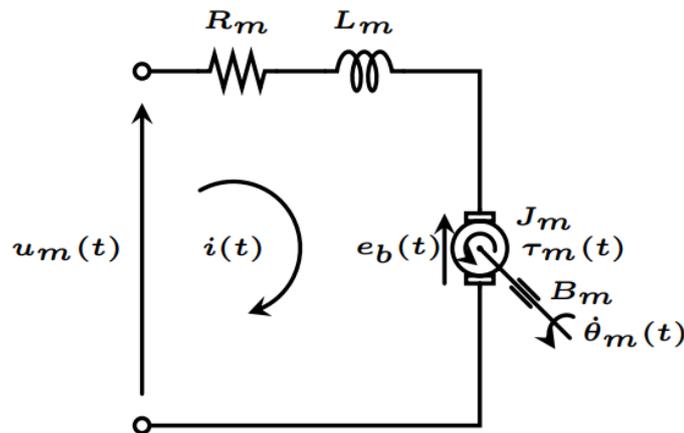
**Figura 2.9**

Diámetro mínimo del eje secundario



### 2.2.7 Diseño del control de velocidad

Se representa esquemáticamente un motor DC en la *Figura 2.10*.

**Figura 2.10***Motor DC*

Aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones del motor bajo condiciones iniciales nulas y eliminando la variable de la corriente eléctrica  $I(s)$  se obtiene la función de transferencia del motor:

$$G_m(s) = \frac{k_m}{(J_m s + B_m)(L_m s + R_m) + k_b k_m} \quad (2.20)$$

Los parámetros necesarios del fabricante para obtener el modelo de la planta son:

**Tabla 2.10***Características del fabricante*

Parámetro	Unidades	
$U_n$	V DC	Tensión nominal
$R_m$	$\Omega$	Resistencia terminal
$L_m$	H	Inductancia del rotor
$J_m$	$kg\ m^2$	Inercia del rotor
$k_b$	Vs/rad	Constante de voltaje
$k_m$	Nm/A	Constante de torque
$I_0$	A	Corriente de motor sin carga

Para este modelo de motor las constantes del par y de la fuerza electromotriz generalmente coinciden  $k_m = k_b$  por lo que se estimó el coeficiente de fricción viscosa  $B_m$  con las siguientes ecuaciones:

$$\omega_n = \frac{U_n - R_m I_0}{k_m} \quad (2.21)$$

Donde  $\omega_n$  representa la velocidad angular del motor.

$$J \frac{d\omega_n}{dt} = k_m I_0 - B_m \omega_n \quad (2.22)$$

Recordando que en estado estable:

$$J \frac{d\omega_n}{dt} = 0 \quad (2.23)$$

$$B_m = \frac{k_m I_0}{\omega_n} \quad (2.24)$$

### 2.2.7.1 Sintonización de controlador PID para el control de velocidad

Se utilizó el encoder Orange Encoder 400 P/R acoplado al eje del motor para obtener su velocidad de giro.

#### Figura 2.11

*Encoder Orange 400 PPR*



Para obtener las constantes del controlador PID se empleó el método por asignación de polos que comienza con el uso de la ecuación del controlador PID convencional donde  $k_c$  es la ganancia proporcional,  $t_d$  es el tiempo derivativo y  $t_i$  el tiempo integral.

$$C(s) = \frac{k_c t_d s^2 + k_c s + \frac{k_c}{t_i}}{s} \quad (2.25)$$

Luego se utilizó la función de transferencia de segundo orden representando al proceso real en la cual  $K$  es la ganancia estática del sistema,  $\omega_n$  es la frecuencia natural no amortiguada y  $\zeta$  el factor de amortiguamiento.

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.26)$$

Donde se obtuvo la función de transferencia en lazo cerrado:

$$H(s) = \frac{k \left( k_c t_d s^2 + k_c s + \frac{k_c}{t_i} \right)}{s^3 + (2\zeta\omega_n + k k_c t_d) s^2 + (\omega_n^2 + k k_c) s + k \frac{k_c}{t_i}} \quad (2.27)$$

Se asignaron los polos al controlador para que la función de transferencia  $H(s)$  se comporte según las especificaciones dadas donde  $P_d(s)$  es el polinomio deseado, el cual contiene dos polos dominantes para gobernar la dinámica del sistema y un polo rápido alejado del eje imaginario.

$$P_d(s) = (s^2 + h_1 s + h_2)(s + p_1) = s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_2 s + \alpha_3 \quad (2.28)$$

Se igualaron las dos ecuaciones características para determinar las constantes de nuestro controlador:

$$s^3 + (2\zeta\omega_n + k k_c t_d) s^2 + (\omega_n^2 + k k_c) s + k \frac{k_c}{t_i} = s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_2 s + \alpha_3 \quad (2.29)$$

Donde:

$$k_c = \frac{\alpha_2 - \omega_n^2}{k} \quad (2.30)$$

$$t_i = \frac{k k_c}{\alpha_3} \quad (2.31)$$

$$t_d = \frac{\alpha_1 - 2\zeta\omega_n}{k k_c} \quad (2.32)$$

$$k_i = \frac{k_c}{t_i} \quad (2.33)$$

$$k_d = k_c t_d \quad (2.34)$$

### 2.2.7.2 Discretización del control de velocidad

Para discretizar el controlador se incorporó un retenedor a la entrada de orden cero y al desarrollar la transformada z se obtuvo la siguiente ecuación donde  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $K_i$  es la ganancia integral,  $K_d$  es la ganancia derivativa las cuales se obtuvieron anteriormente y  $T_s$  el tiempo de muestreo.

$$PID_s = K_p + K_i T_s \frac{1}{z-1} + \frac{K_d z - 1}{T_s z} \quad (2.35)$$

Para poder programar y utilizar la ecuación en un microcontrolador, se convirtió la transformada z a una ecuación de diferencias, obteniendo la siguiente ecuación donde  $cv(n)$  es el valor de control en el instante  $n$ ,  $cv(n-1)$  es el valor de control en el instante anterior,  $e(n)$  es el error en el instante  $n$ ,  $e(n-1)$  es el error en el instante anterior, y  $e(n-2)$  es el error dos instantes atrás.

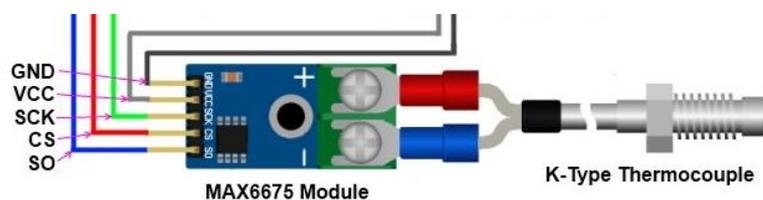
$$cv(n) = cv(n-1) + \left(K_p + \frac{K_d}{T_s}\right) e(n) + \left(-K_p + K_i T_s - 2 \frac{K_d}{T_s}\right) e(n-1) + \frac{K_d}{T_s} e(n-2) \quad (2.36)$$

## 2.2.8 Diseño del control de temperatura

Para el desarrollo del control de temperatura se utilizó como sensor la termocupla tipo K y su respectivo transmisor MAX6675 el cual realiza la compensación y linealización del sensor con un ADC los cuales cumplen con el rango de temperatura de trabajo requerido.

**Figura 2.12**

*Termocupla tipo K y transmisor MAX6675*



Se realizó el control por medio de histéresis en el cual se aplica la siguiente ecuación donde  $T(t)$  es la temperatura en el tiempo  $t$ ,  $T_{set}$  es la temperatura objetivo,  $\Delta T$  la banda de histéresis y  $u(t)$  es la señal de control para el encendido/apagado del calentador.

$$u(t) = \begin{cases} 1; & \text{si } T(t) < T_{set} - \frac{\Delta T}{2} \\ 0; & \text{si } T(t) > T_{set} + \frac{\Delta T}{2} \end{cases} \quad (2.37)$$

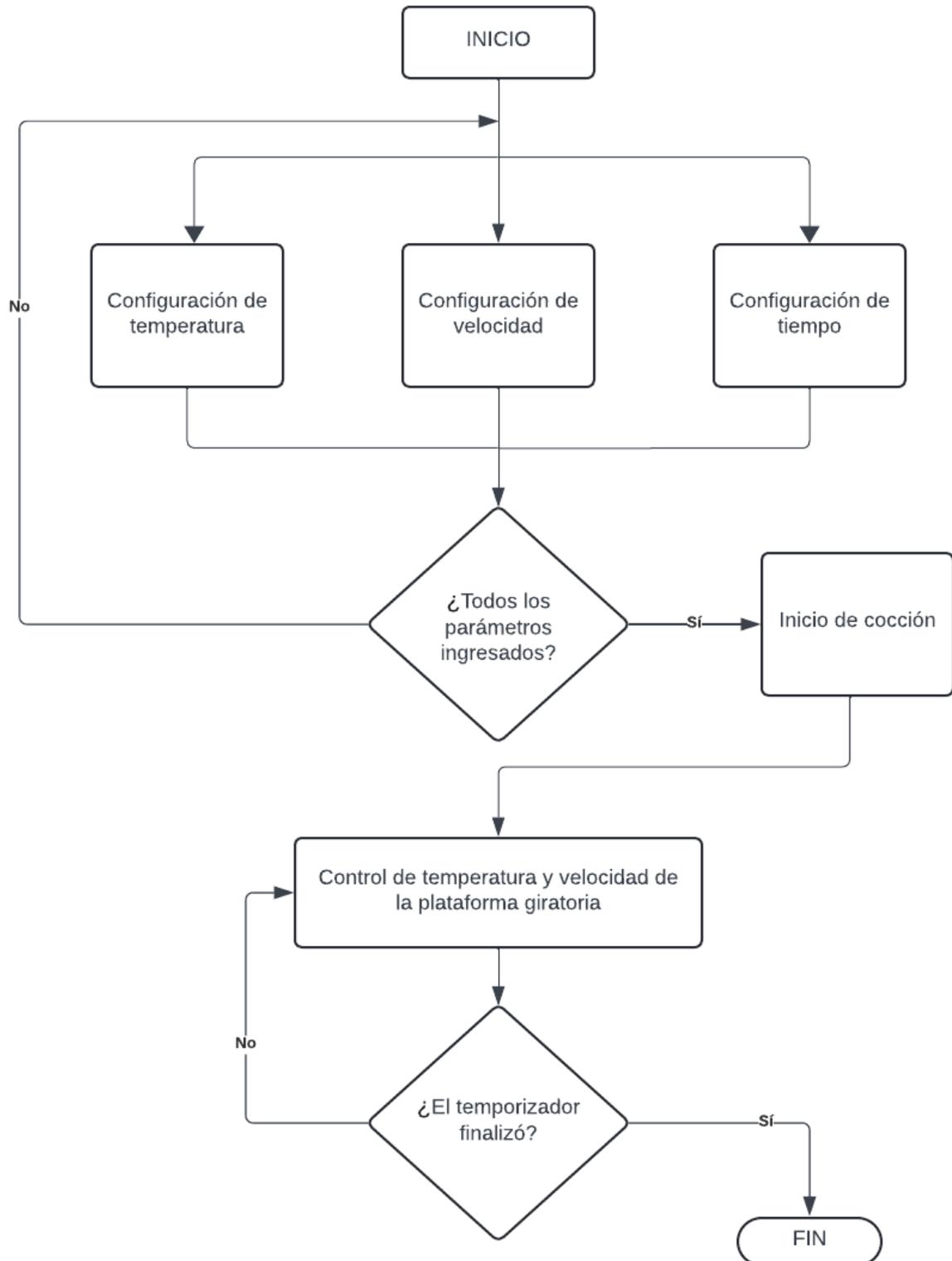
### 2.2.9 Diagrama de programación del microcontrolador

Para la programación del microcontrolador, se configuraron las entradas y salidas del sistema estableciendo los pines correspondientes. El horno se enciende al conectarlo al tomacorriente, y el Arduino muestra una pantalla de inicio en modo de menú en la LCD. Este menú permite al usuario navegar por diferentes pantallas para configurar los parámetros necesarios para la cocción: tiempo, temperatura y velocidad de la plataforma giratoria.

El usuario selecciona los valores de estos parámetros utilizando un potenciómetro y los confirma a través de una línea de confirmación en la pantalla. Una vez establecidos los valores, se selecciona la opción de inicio de cocción, iniciando así el conteo del temporizador con el tiempo previamente configurado. Durante este periodo, el sistema controla la temperatura y la velocidad de la plataforma de acuerdo con los parámetros y las ecuaciones previamente calculadas. Al finalizar el tiempo del temporizador, el proceso de cocción se detiene automáticamente. El algoritmo de programación se resume en el diagrama de flujo presentado en la *Figura 2.13*.

**Figura 2.13**

*Diagrama de flujo de la programación del microcontrolador*



## **CAPITULO 3**

### 3.1 Resultados y análisis

#### 3.1.1 Calor y Conservación del entorno calefactor

**Tabla 3.1**

*Calor Absorbido por las cargas*

Parámetro	Valor	Unidades
$Q_{sensible}$	703.125	<i>kJ</i>
$Q_{evap}$	508.5	<i>kJ</i>
$Q_{conv}$	6945.02	<i>kJ</i>
$Q_{rad}$	8484.51	<i>kJ</i>
$Q_{carga}$	16641.16	<i>kJ</i>

En la siguiente tabla se pueden observar los resultados del cálculo del calor necesario para el proceso de calentamiento, desglosando cada tipo de calor que está involucrado en este análisis. Cabe recalcar que este análisis se realizó con un enfoque simplificado al sumar las áreas de las pizzas que estarían incluidas en el escenario de capacidad máxima del horno (3 pizzas familiares y 1 pizza mediana a la vez) para así considerar estas como un solo cuerpo. Estos valores, cuya suma es el valor de  $Q_{carga}$  fueron obtenidos considerando los principios de termodinámica y aproximaciones obtenidas de las tablas de propiedades de los diferentes ingredientes de una pizza puesto que no existen valores exactos de Capacidad calorífica o de los coeficientes involucrados en este cálculo y los materiales de los que estaría compuesto el horno diseñado.

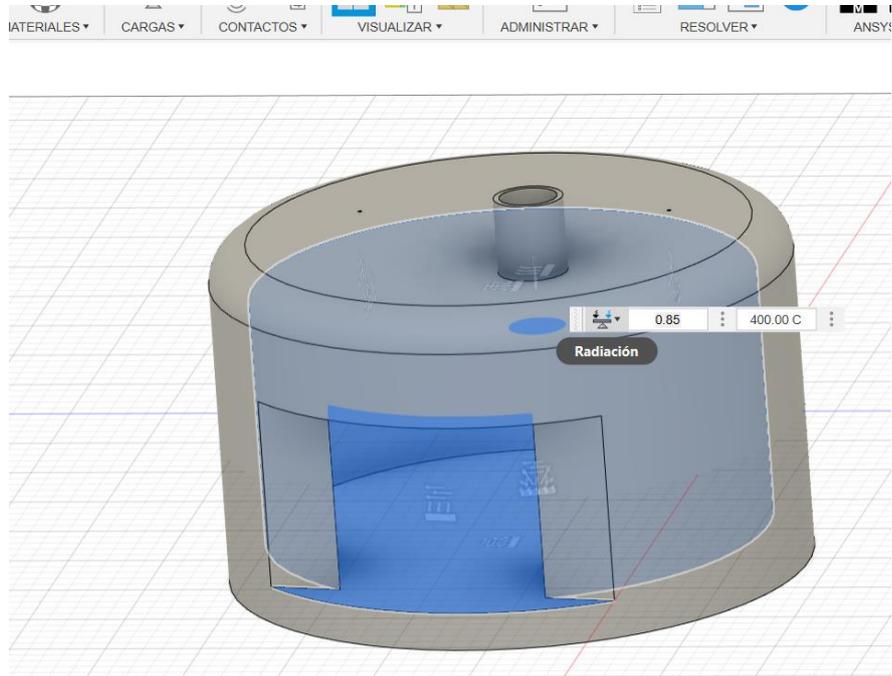
**Tabla 3.2**

*Calor Perdido por el entorno*

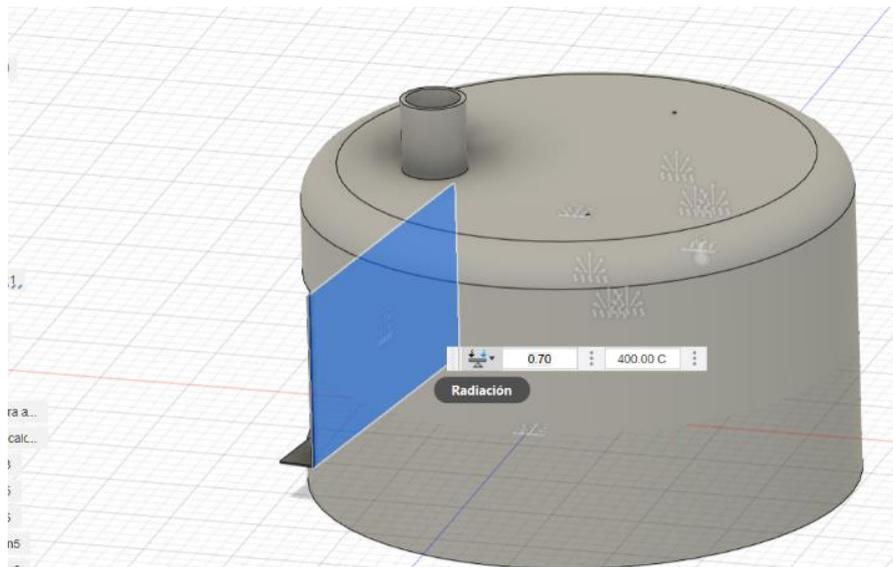
Parámetro	Valor	Unidades
$Q_{convección}$	51843.75	<i>W</i>
$Q_{radiación}$	47343.19	<i>W</i>
$Q_{perdidasTotal}$	99186.9459	<i>W</i>

**Figura 3.1**

*Aplicación de carga de Radiación a paredes internas del horno*

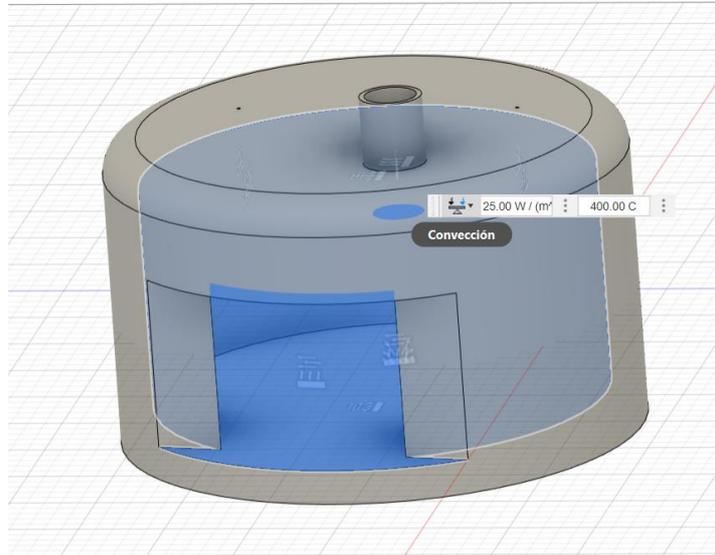
**Figura 3.2**

*Aplicación de carga de Radiación a pared interna de puerta del horno*

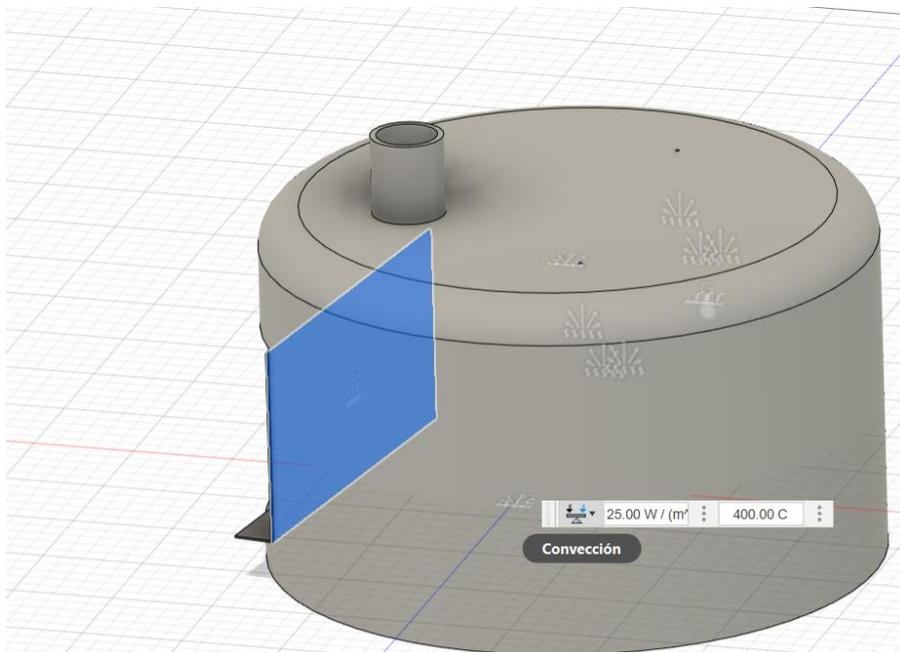


**Figura 3.3**

*Aplicación de carga de Conducción a paredes internas del horno*

**Figura 3.4**

*Aplicación de carga de Convección a pared interna de puerta del horno*

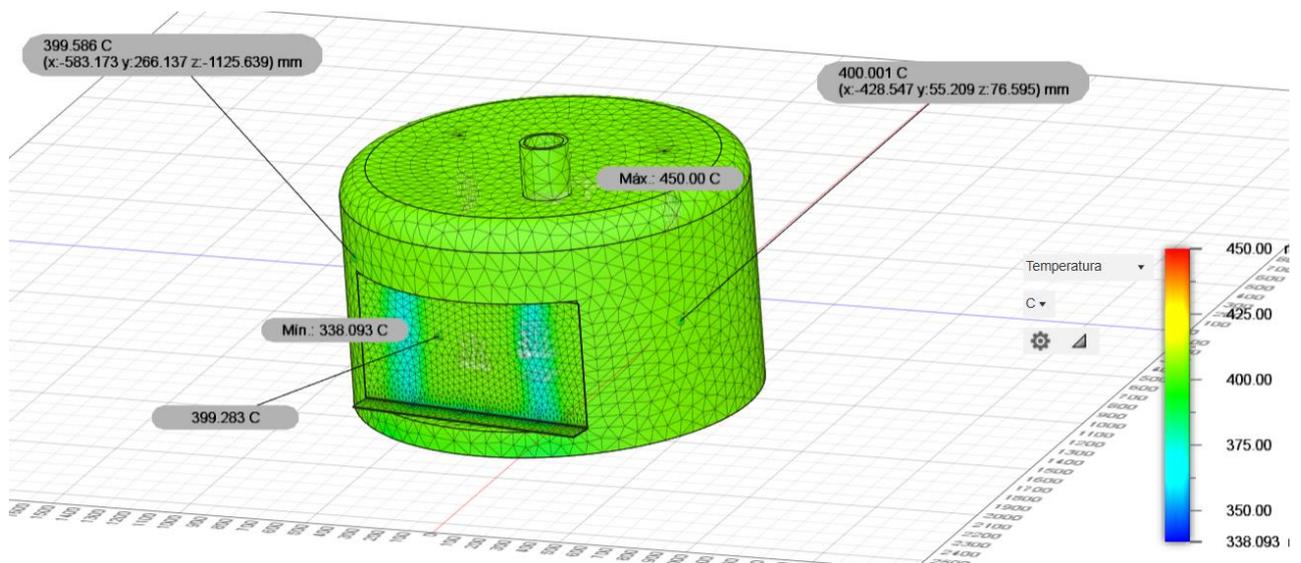


En las Figuras 3.1 a 3.4 Se puede observar cómo se aplicaron las cargas térmicas para analizar por medio de la simulación la pérdida de calor por el entorno, en este caso se aplicaron las respectivas cargas de radiación y convección en las paredes internas del horno y la cara interna

de la puerta. Dado que los materiales del horno y la puerta son diferentes se tuvo que aplicar 4 cargas térmicas con sus respectivos coeficientes de emisividad.

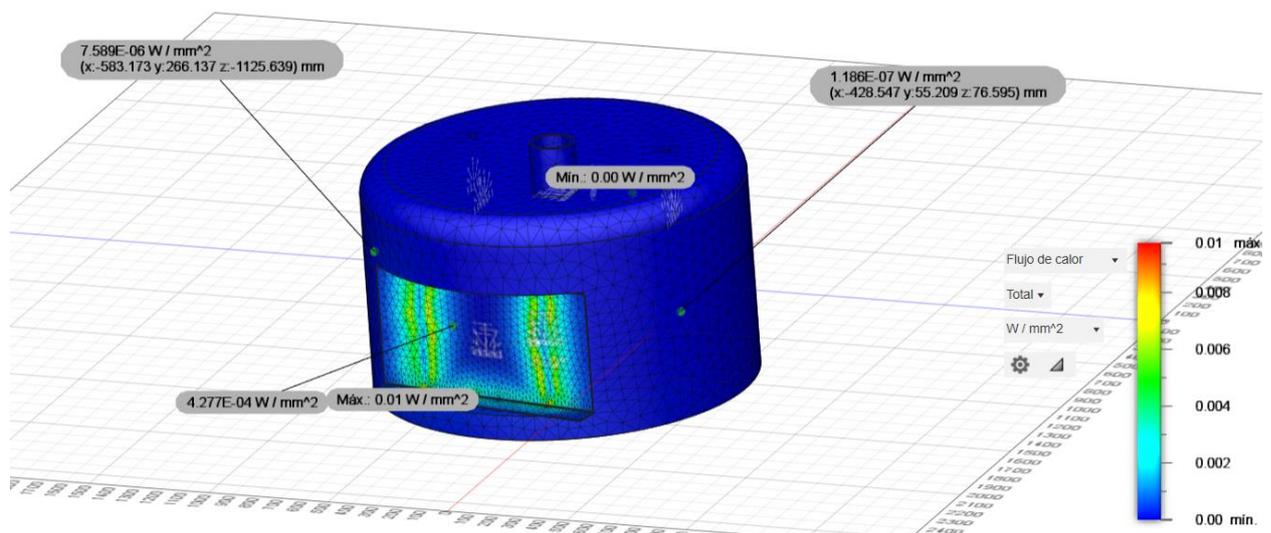
**Figura 3.5**

*Resultados de simulación térmica estacionaria Análisis perdidas por entorno*



**Figura 3.6**

*Resultados de simulación térmica estacionaria Análisis perdidas por entorno*



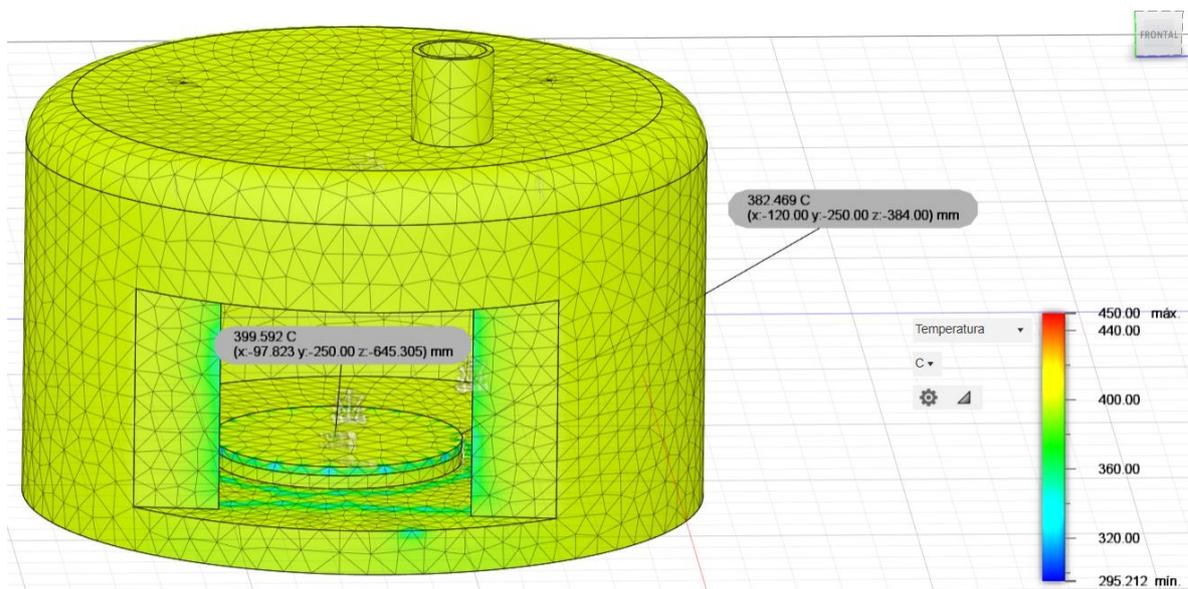
En las *Figuras 3.5 y 3.6* se puede observar que el diseño del horno cumple con el requerimiento de mantener una Temperatura operativa de  $400^{\circ}\text{C}$  en la mayor parte de su cavidad. Con esto se demuestra que las pérdidas de calor por el entorno, que están principalmente concentradas en la zona de la puerta, se compensan adecuadamente con el diseño del horno y así asegurando que exista una distribución térmica adecuada. Se puede observar en la *Figura 3.6* que

el flujo de calor máximo registrado en la zona de la puerta es de  $0.01 \text{ W/mm}^2$  lo cual adecuado con las expectativas esperadas en los puntos de apertura. Al conocer y considerar el área de la cavidad de calefacción del Horno ( $0.7983 \text{ m}^2$ ), se puede concluir que este diseño es funcional y robusto cumpliendo con los requerimientos de Temperatura deseados.

Al comparar los resultados de las simulaciones con los resultados teóricos mostrados en la tabla 3.2, se puede ver que en la simulación el flujo de calor máximo es de  $10 \text{ W/m}^2$  y al ser este multiplicado por el área total del horno se da a conocer la existencia de una pérdida de unos  $8 \text{ W}$  en las áreas de mayor pérdida térmica como la puerta. Esta diferencia entre las pérdidas teóricas y las simuladas se las atribuyen a la simplificación de condiciones que ocurre en una simulación y a la distribución no uniforme de calor en la vida real. Aun así, se puede observar como el diseño del horno gestiona el calor de manera correcta dentro de los límites esperados, logrando mantener las  $T$  necesaria para la cocción de las cargas. Dejando en claro que, aunque existan diferencias en las magnitudes absolutas de las pérdidas de calor teóricas y simuladas, el diseño sigue siendo efectivo en la práctica, con la puerta como el principal punto de mejora potencial para optimizar la eficiencia energética.

### Figura 3.7

*Resultados de simulación térmica estacionaria Análisis Delta T superficies de la carga*



En la *Figura 3.7* se puede observar la masa de pizza simulada y su bandeja de cocción, como podemos observar con las probetas de sonda ubicadas en la cara superior e inferior de la pizza el delta T es mínimo lo que nos permite indicar que existe una cocción uniforme adecuada.

Hay que recalcar que en la realidad la pizza no alcanzará esas temperaturas puesto que no estará un tiempo infinito dentro del horno, pero se muestra de esa manera debido a que es una simulación estacionaria pero igual nos sirve para demostrar la poca diferencia de temperatura que existiría entre las caras de las pizzas al momento de ser horneadas.

La potencia con la que se realizaron estos análisis es de 7kW , este valor de potencia elegido está respaldado por los valores de calor requeridos por las cargas observados en la tabla 3.1 que establece que el calor necesario para que las pizzas se horneen correctamente es de 16.64 MJ , por lo tanto como el diseño de horno contiene una resistencia calefactora de potencia de 7kW se puede observar que será capaz de suministrar la energía necesaria para la cocción en un tiempo razonable compensando las pérdidas de calor que se darían en el proceso de horneado. Aunque los resultados de la tabla son confusos al analizar de manera detallada todos los datos obtenidos al realizar el análisis esta potencia aplicada es suficiente para mantener la eficiencia térmica del horno, garantizando una cocción uniforme.

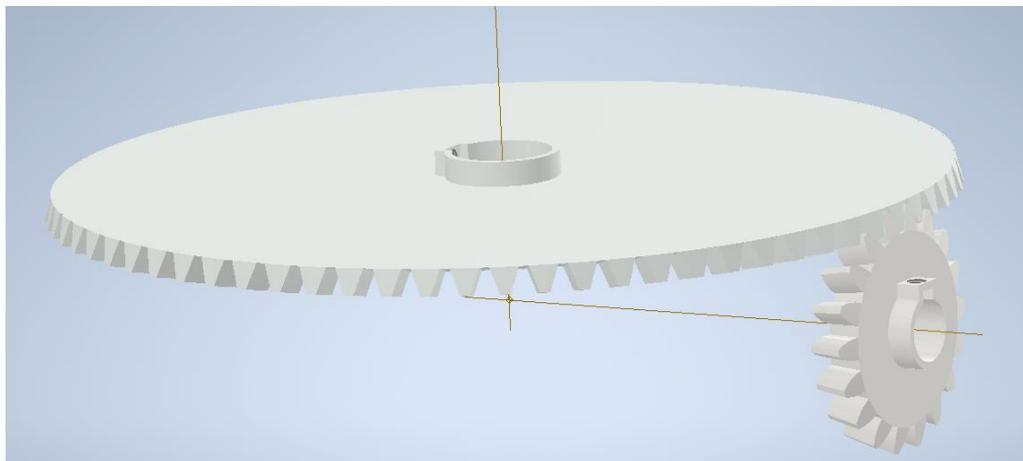
### 3.1.2 Sistema mecánico de rotación

#### 3.1.2.1 Engranajes

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante el diseño de los engranajes, considerando tanto los aspectos geométricos como los materiales seleccionados y las evaluaciones de seguridad. La *Figura 3.8* muestra el modelo del engranaje diseñado.

#### **Figura 3.8**

##### *Engranajes*



### Figura 3.9

*Material seleccionado para el engrane en la simulación de Inventor*

		Engranaje 1	Engranaje 2
		A576-1015	A576-1015
Resistencia máxima a tracción	$S_u$	495 MPa	495 MPa
Límite de elasticidad	$S_y$	295 MPa	295 MPa
Módulo de elasticidad	E	206000 MPa	206000 MPa
Coefficiente de Poisson	$\mu$	0.300 su	0.300 su

De la *Figura 3.9* se observa los materiales seleccionados para los engranes para garantizar que puedan soportar las fuerzas a las que serán sometidos sin deformarse permanentemente, con lo que en la *Figura 3.10* se demuestra los factores que aseguran su operación bajo las condiciones previstas.

### Figura 3.10

*Factores de seguridad de los engranes*

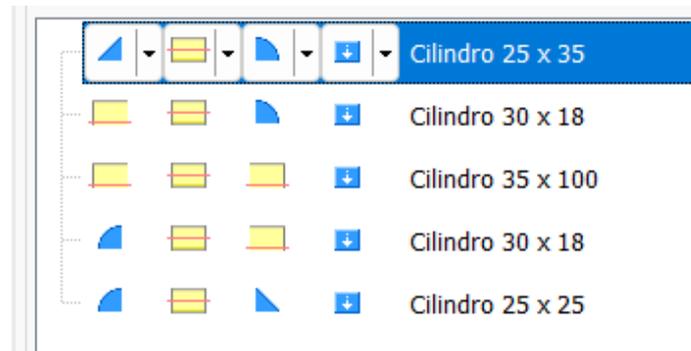
Coefficiente de seguridad contra corrosión	$S_H$	2.574 su	3.315 su
Coef. seguridad contra rotura de diente	$S_F$	7.775 su	8.651 su
Seguridad estática en contacto	$S_{Hst}$	5.297 su	5.939 su
Seguridad estática en plegado	$S_{Fst}$	16.417 su	17.572 su
Comprobar cálculo		<b>Positivo</b>	

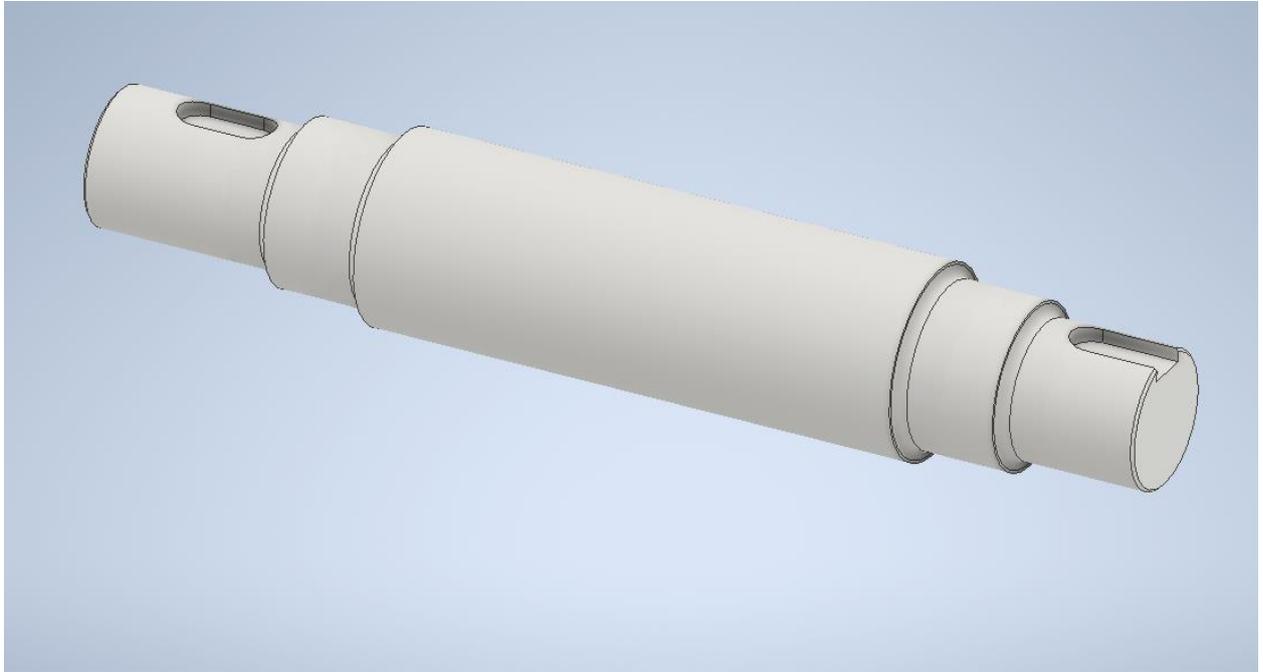
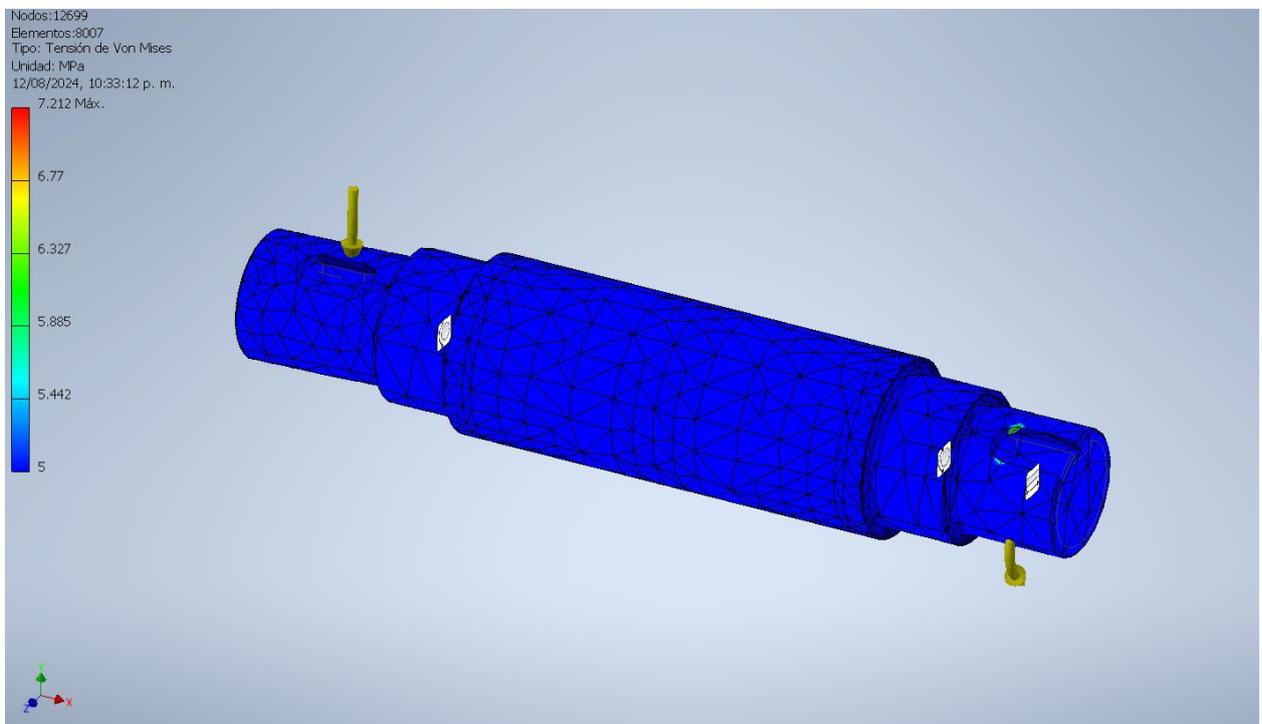
#### 3.1.2.2 Eje principal

El eje principal se configuró según las especificaciones de sus componentes asociados y cálculos previos de diámetro mínimo. Las *Figuras 3.11* y *3.12* muestran respectivamente las medidas exactas y el modelo del eje principal.

### Figura 3.11

*Dimensiones del eje principal*



**Figura 3.12***Eje principal***Figura 3.13***Análisis de tensión eje principal*

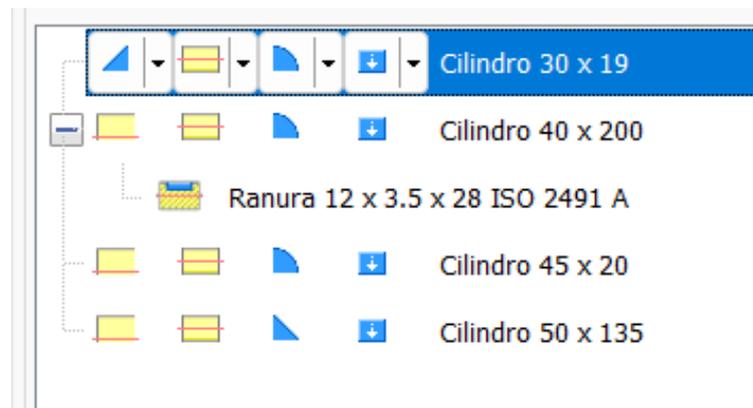
La *Figura 3.13* presenta los resultados del análisis por elementos finitos del eje, realizado con Inventor, incorporando cargas externas calculadas, fuerzas gravitacionales y restricciones de pasador y fijas apropiadas. En el análisis se muestra 7.21 MPa máximo en la tensión de Von Mises.

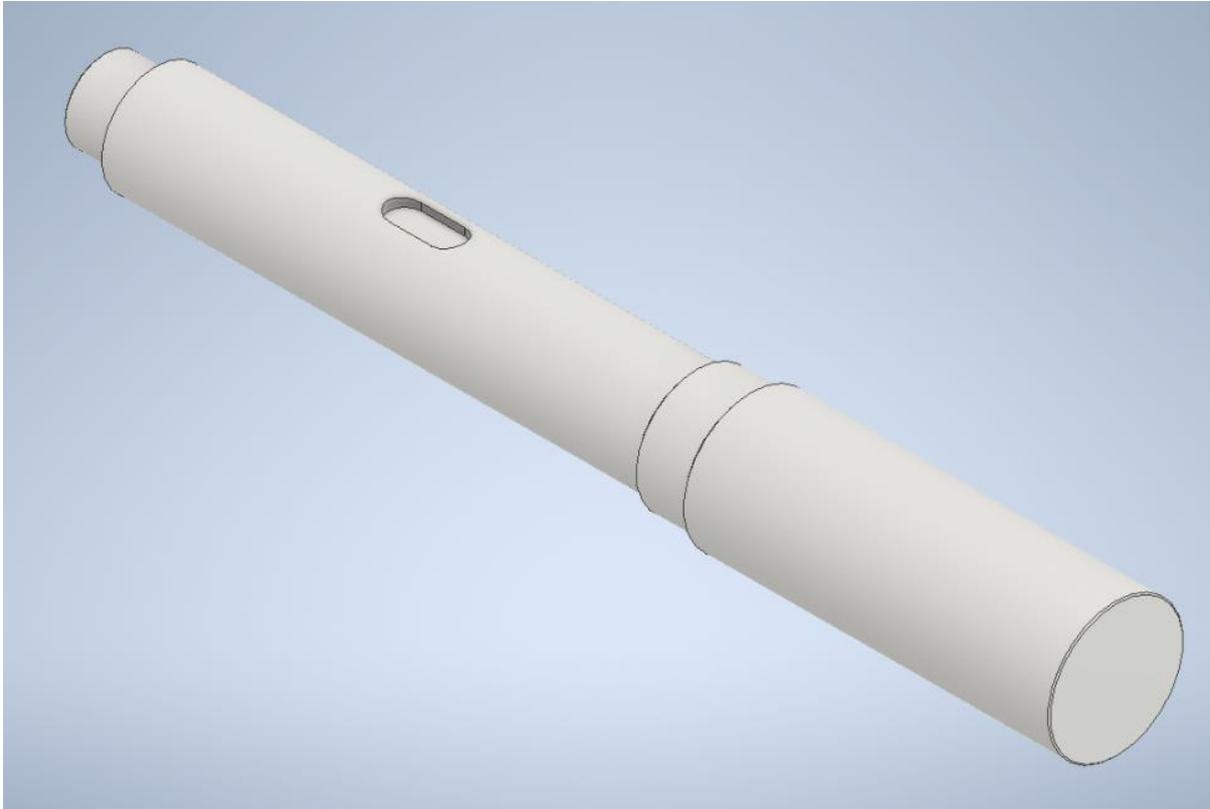
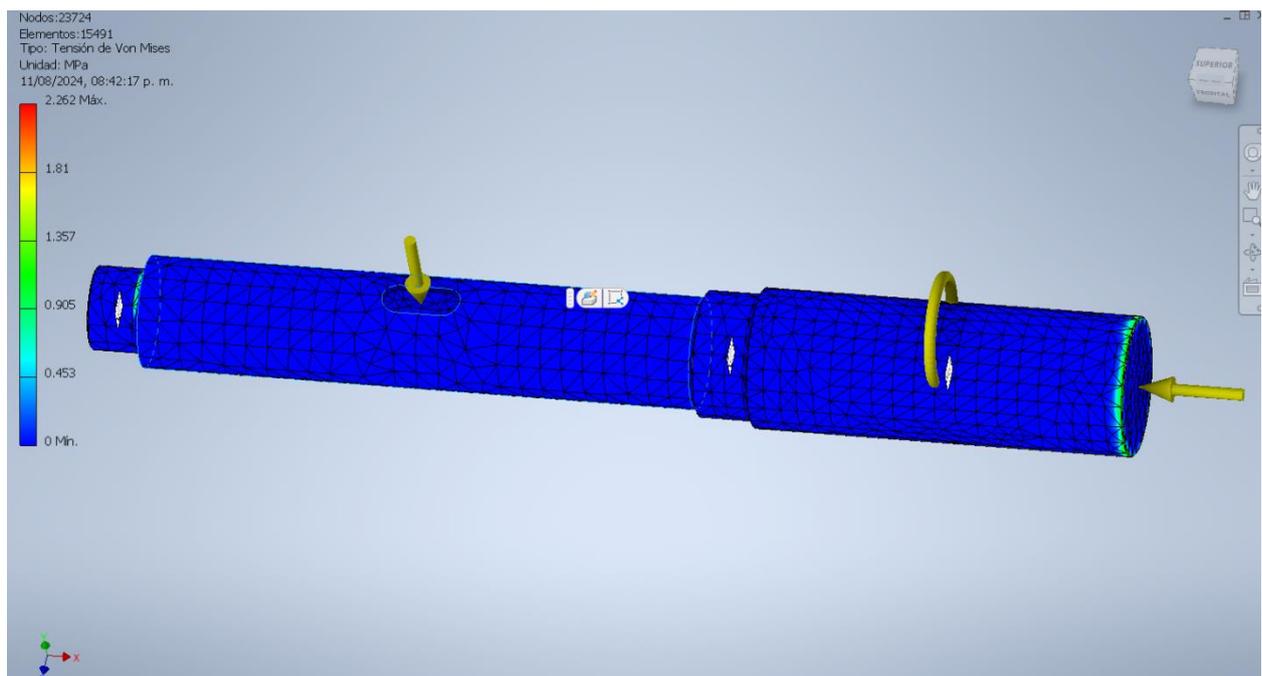
### 3.1.2.3 Eje secundario

Para el eje secundario se aplicaron criterios de diseño similares al eje principal. Las dimensiones precisas del eje secundario se encuentran en la *Figura 3.14* y el modelado en la *Figura 3.15*.

#### Figura 3.14

*Dimensiones del eje secundario*



**Figura 3.15***Eje secundario***Figura 3.16***Análisis de tensión eje secundario*

En el análisis de la *Figura 3.16* se muestra el análisis donde se obtuvo la tensión de Von Mises con 2.262 MPa máximo.

#### 3.1.2.4 Materiales del sistema de rotación

Se seleccionaron los materiales de cada componente como se observa en la *Tabla 3.3* en base a los análisis de tensión realizados seleccionando tipos de acero que se encuentren en el mercado local y que tengan un esfuerzo a la fluencia mayor al esfuerzo máximo de Von Mises de cada pieza.

**Tabla 3.3**

*Esfuerzo de fluencia de cada componente*

Pieza	Material	Esfuerzo de fluencia
Eje principal	Acero AISI 316	205 MPa
Eje secundario	Acero AISI 316	205 MPa
Engranés	Acero AISI 1015	295 MPa

Dado que ninguno de los esfuerzos de fluencia de cada pieza es menor al máximo esfuerzo de Von Mises en el análisis, se puede corroborar que el diseño del sistema mecánico de rotación de la plataforma giratoria fue apto para soportar las cargas.

#### 3.1.3 Motor seleccionado

Se analizaron las opciones locales de motores DC que cumplieran con los requisitos previamente descritos. Finalmente, se seleccionó un motor DC de la marca LEESON de 190 W. Las especificaciones detalladas de este motor se presentan en la *Tabla 3.4*.

**Tabla 3.3**

*Especificaciones del motor DC*

Parámetro	Valor	Unidades	
$P$	0.19	kW	<i>Potencia</i>
RPM	42	rpm	<i>Velocidad</i>
$U_n$	12	V DC	<i>Tensión nominal</i>
$R_m$	0.053	$\Omega$	<i>Resistencia terminal</i>
$L_m$	0.00012	H	<i>Inductancia del rotor</i>

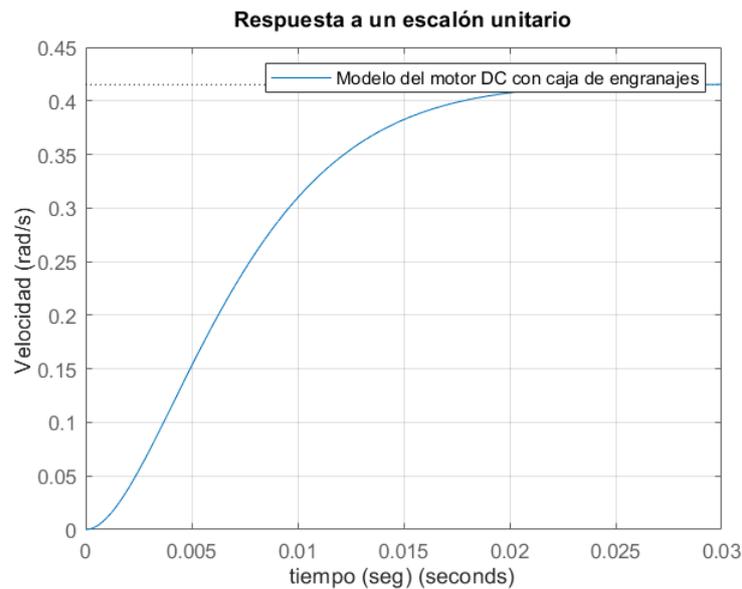
$J_m$	0.0001885	$kg\ m^2$	<i>Inercia del rotor</i>
$k_b$	3.908	$Vs/rad$	<i>Constante de voltaje</i>
$k_m$	0.3304	$Nm/A$	<i>Constante de torque</i>
$I_0$	21	$A$	<i>Corriente de motor sin carga</i>

### 3.1.4 PID velocidad

En la *Figura 3.17* se presenta la gráfica que muestra la respuesta del sistema al escalón, obtenido mediante la simulación del modelo matemático del motor seleccionado.

**Figura 3.17**

*Respuesta al escalón del modelo del motor*



En la *Tabla 3.5*, se muestran los valores de las constantes obtenidos en el código que se muestra en el *Apéndice F* en el software Matlab para ajustar la respuesta del sistema.

**Tabla 3.4**

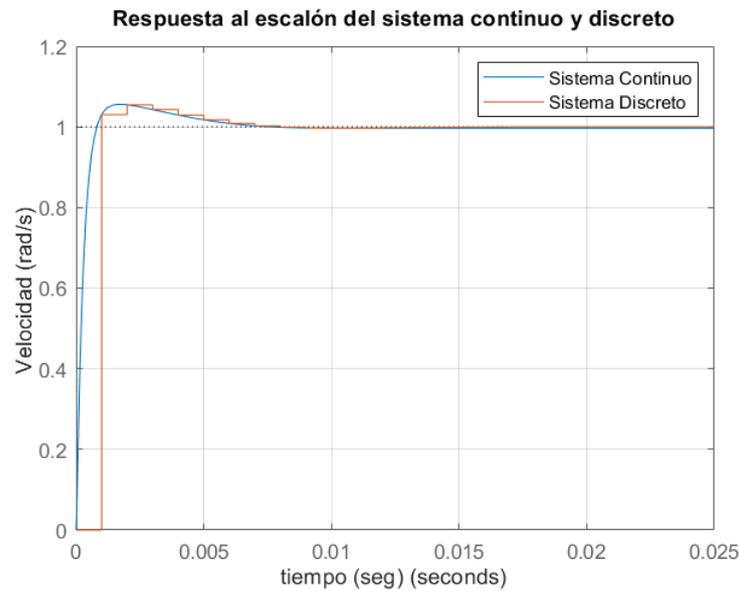
*Valores de las constantes del controlador PID*

Parámetro	Valor
Kp	92.2423
Ki	29771
Kd	0.1374

La *Figura 3.18* compara la respuesta al escalón del sistema en lazo cerrado, tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto, mostrando la efectividad del controlador PID en ambas configuraciones. Con lo que se demuestra que el controlador del sistema es aplicable en equipos que trabajan en tiempo discreto para agregarlos en la programación del microcontrolador.

### Figura 3.18

*Respuesta al escalón del sistema controlado*

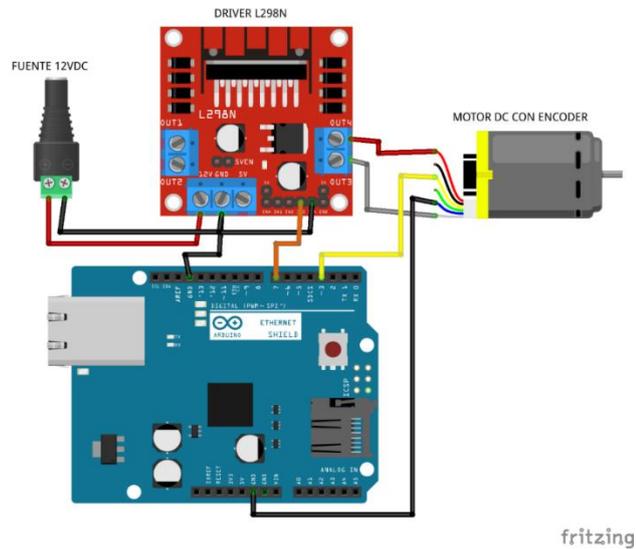


### 3.1.5 Prueba de concepto del control de velocidad

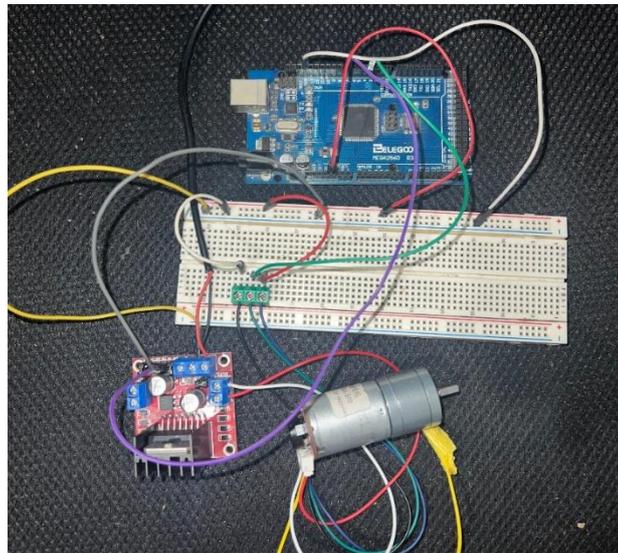
La *Figura 3.19* y *3.20* muestra el circuito esquemático para la prueba de concepto del control de velocidad aplicado en nuestro proyecto.

**Figura 3.19**

*Esquema eléctrico del circuito de prueba para el control de velocidad*

**Figura 3.20**

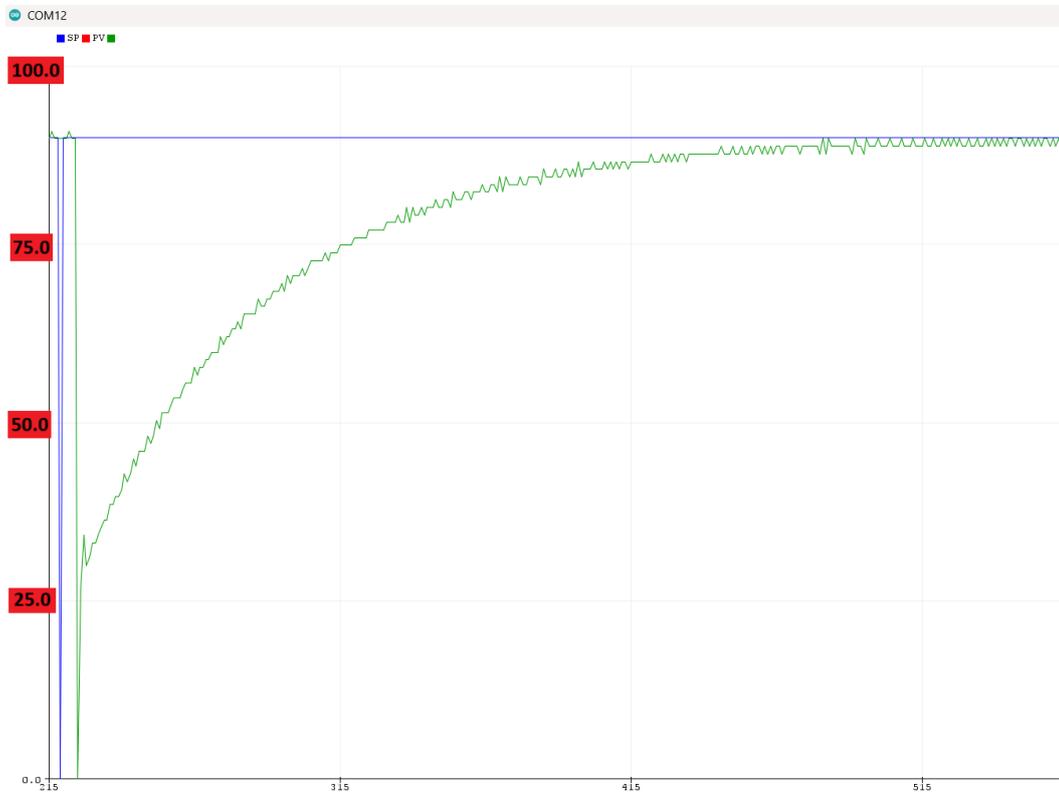
*Prueba de concepto para el funcionamiento del control de velocidad*



En la *Figura 3.21* se demuestra el sistema controlado de velocidad para la prueba de concepto en donde se utilizó el código generado en Arduino IDE adjunto en el *Apéndice D*. El modelo del motor seleccionado para la prueba es el 25ga-370 y el set point de velocidad de 90 RPM.

**Figura 3.21**

*Respuesta del funcionamiento del control de velocidad en Arduino*

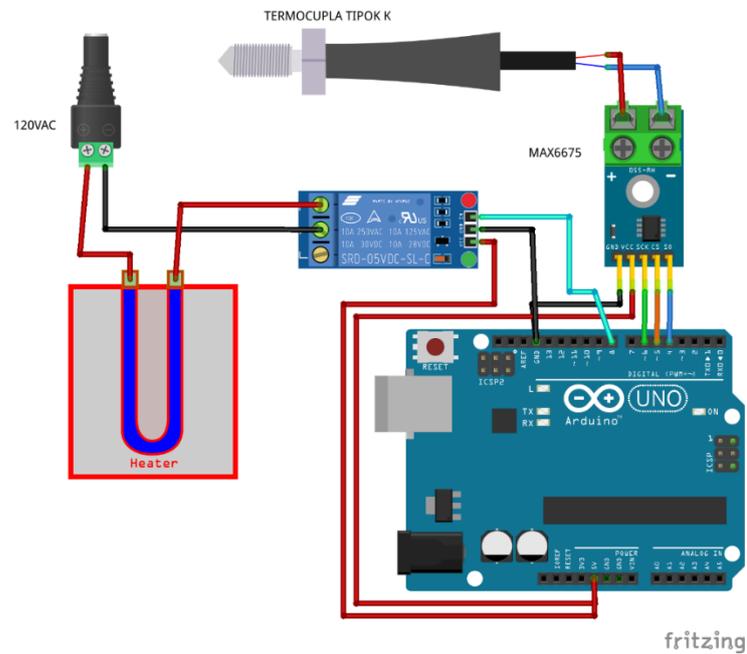


### 3.1.6 Prueba de concepto del control de temperatura

La *Figura 3.22* y *3.23* muestra el circuito esquemático para la prueba de concepto del control de temperatura aplicado en nuestro proyecto. Se utilizó un foco incandescente como calentador del sistema.

**Figura 3.22**

*Esquema eléctrico del circuito de prueba para el control de temperatura*

**Figura 3.23**

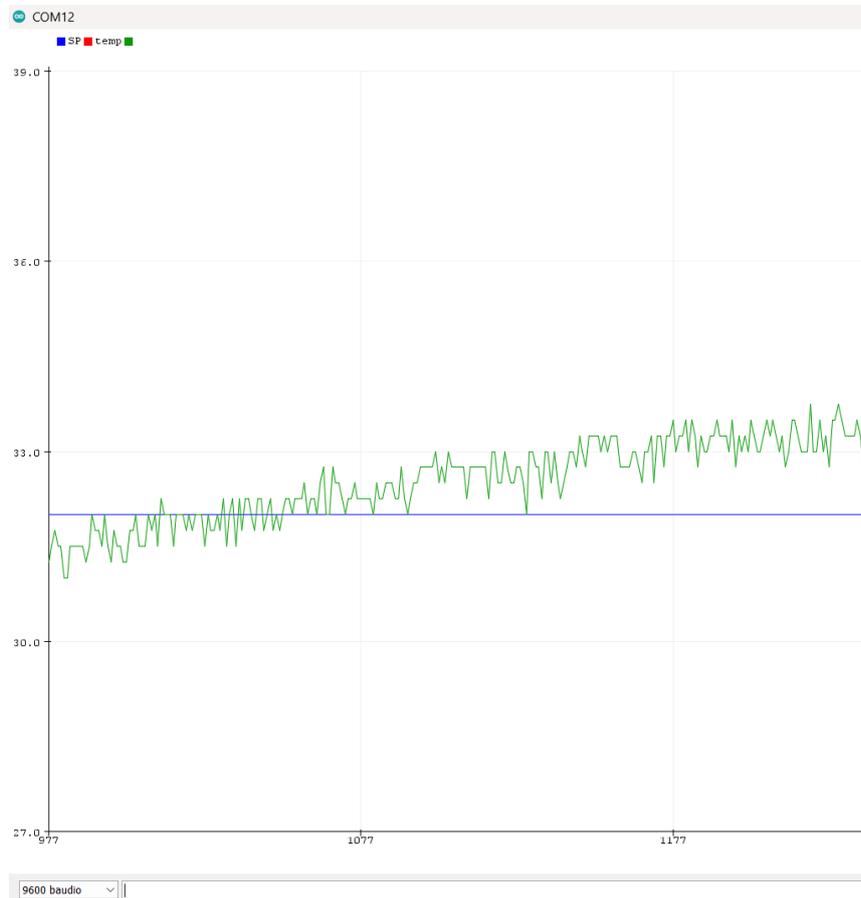
*Prueba de concepto para el funcionamiento del control de temperatura*



En la *Figura 3.24* se demuestra el sistema controlado de temperatura para la prueba de concepto en donde se utilizó el código generado en Arduino IDE adjunto en el *Apéndice D*. El control de temperatura de prueba se realizó con un rango de histéresis de  $\pm 2$  grados celsius y con un set point de temperatura de  $30^{\circ}$  grados celsius.

**Figura 3.24**

*Respuesta del funcionamiento del control de temperatura en Arduino*

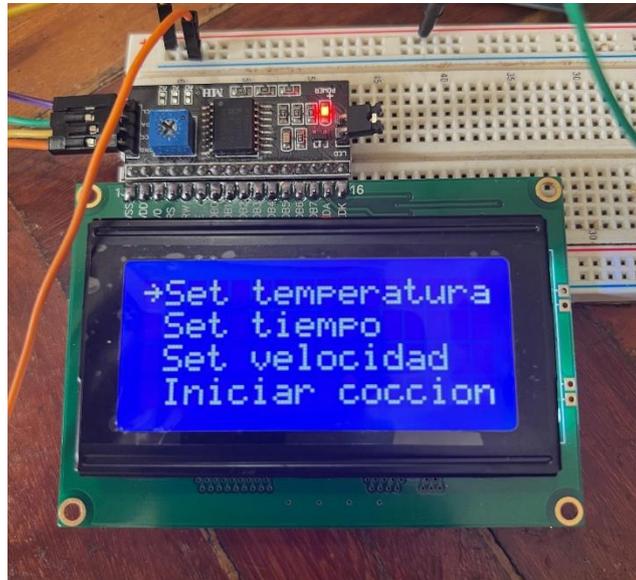


### 3.1.7 Prueba de concepto de la interfaz

Se ha implementado el código de la interfaz para el usuario donde se inicia con un menú principal para configurar los parámetros: temperatura, velocidad de rotación, y tiempo de cocción como se muestra en la *Figura 3.25, 3.26, 3.27 y 3.28*.

**Figura 3.25**

*Pantalla del menú principal de la interfaz*

**Figura 3.26**

*Pantalla de la configuración de la temperatura de la interfaz*

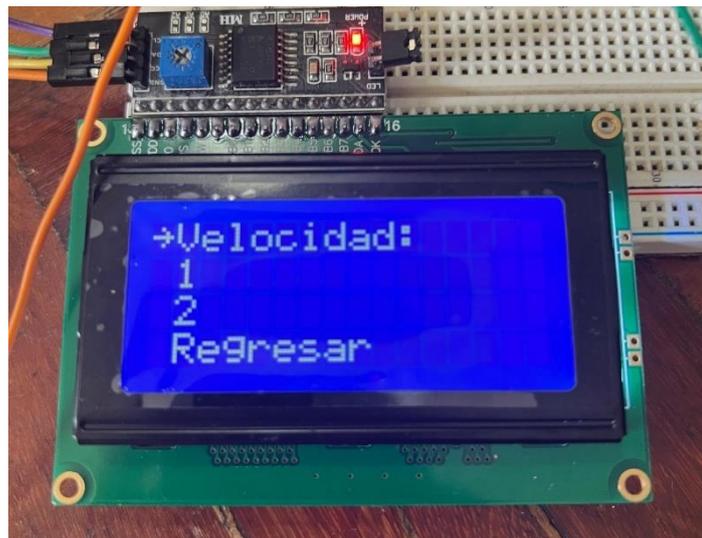


**Figura 3.27**

*Pantalla de la configuración del tiempo de la interfaz*

**Figura 3.28**

*Pantalla de la configuración de la velocidad de la interfaz*



Una vez que se inicia la cocción, el programa monitoriza y ajusta continuamente los parámetros según sea necesario. Se muestra un temporizador con relación al tiempo establecido y la temperatura real del sistema como se observa en la *Figura 3.29*.

**Figura 3.29**

*Pantalla del inicio de cocción de la interfaz*



Al analizar las pruebas por separado y probar su correcto funcionamiento se integraron las partes respectivas del control de velocidad, temperatura y de la interfaz como se puede observar en el *Apéndice E*.

### 3.1.8 Análisis de costos

**Tabla 3.6**

*Costos del diseño*

Categoría	Descripción	Costo unitario	Cantidad	Costo total
Equipo mecánico	Motor DC LEESON	\$764,49	1	\$764,49
	Rodamientos 62-30-16mm	\$8,62	2	\$17,24
	Rodamientos 85-45-19mm	\$13,93	1	\$13,93
	Rodamientos 52-30-16mm	\$36,41	1	\$36,41
	Soportes de rodamientos	\$112,55	1	\$112,55
	Pernos y tuercas	\$10,50	1	\$10,50
	Equipo electrónico	Componentes electrónicos	\$84,98	1
	Microcontrolador Arduino MEGA	\$25,00	1	\$25,00
	Encoder	\$50,00	1	\$50,00
	Termocupla tipo K	\$2,00	1	\$2,00
	Resistencias tubulares	\$50,00	2	\$100,00
Mecanizado	Ejes	\$30,00	2	\$60,00

	Engranés		\$100,00	1	\$100,00
Mano de obra	Fabricación estructura del horno		\$800,00	1	\$800,00
	Fabricación de la plataforma		\$300,00	1	\$300,00
	Fabricación de brida		\$100,00	1	\$100,00
	Fabricación de soporte plataforma		\$150,00	1	\$150,00
	Costos de servicios		\$300,00	1	\$300,00
<b>TOTAL</b>					<b>\$3.027,10</b>

En la *Tabla 3.6* podemos observar un desglose detallado de los componentes mecánicos, electrónico, mano de obra y mecanizado que serían necesarios para la fabricación e implementación de nuestro diseño de horno para pizza. El costo total asciende a un valor de \$ 3027.10 lo cual refleja un inversión considerable en componentes de calidad y en la mano de obra especializada que se requiere para el ensamble y construcción del horno, pero al comparar este costo total con los hornos industriales italianos de buena gama como los son las marcas Marrone, Alfa Pro, Morello Forni entre otros ,cuyos valores de adquisición se encuentran en el rango de \$25000 se puede observar un diferencia significativa en la inversión inicial. Se puede observar que, por un costo total que representa aproximadamente el 12% del precio de un horno italiano importado, el proyecto local ofrece una solución competitiva que, aunque puede no alcanzar el prestigio y las características técnicas de marcas como Marrone, Alfa Pro, o Morello Forni, cumple con los requisitos necesarios para un horno industrial de pizza, brindando una opción viable y económica para el mercado local.

## **CAPITULO 4**

## 4.1 Conclusiones y recomendaciones

En esta sección describiré la importancia del trabajo desarrollado, las fortalezas y las debilidades. Así como las conclusiones obtenidas a partir del análisis de los resultados.

### 4.1.1 Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas en función de los objetivos planteados y los resultados previamente expuestos.

- El uso de un sistema de control de velocidad PID ha demostrado ser eficaz para ajustar la velocidad según las condiciones definidas por el usuario en tiempo continuo y discreto (Figura 3.18). Con las pruebas de concepto se observa que la respuesta del controlador es más lenta y se llega al set point de velocidad con una efectividad del 90% (Figura 3.21).
- La implementación de un control de temperatura ON/OFF dentro de la programación del microcontrolador y realizando las pruebas de concepto en el prototipo de baja resolución se demuestra la efectividad del sistema (Figura 3.24).
- Los resultados obtenidos del análisis de elementos finitos realizado en los ejes (Figura 3.13 y 3.16), la comparación de esfuerzos de fluencia de cada material seleccionado según el esfuerzo de Von Mises máximo (Tabla 3.3) y el factor de seguridad del diseño de los engranes (Figura 3.10), permiten concluir que el diseño mecánico para el movimiento de la plataforma del horno es capaz de soportar las cargas máximas de operación bajo las condiciones de trabajo previstas.
- El desarrollo de una interfaz permitió validar el diseño del equipo (Figura 3.25) para validar su diseño y así visualizar y configurar los parámetros de cocción: temperatura, velocidad y tiempo para el monitoreo del proceso con el temporizador incorporado en la programación.
- Los resultados que se obtuvieron respecto a la conservación de calor por medio del uso del software Fusion 360 (Figura 3.5) demuestran que la estructura, material y potencia

calefactora 7kW escogidos para el horno son adecuados para la conservación eficiente del calor, la distribución de la temperatura y la minimización de las pérdidas de calor asegurando un ambiente adecuado para la cocción eficiente de las pizzas.

- El uso del software Fusion 360 permitió demostrar que el delta de Temperatura entre las caras superior e inferior de la pizza (Figura 3.7) es mínimo lo que indica una cocción uniforme validando la efectividad del diseño del horno y la potencia calefactora para que ocurra una cocción lo más homogénea posible en todas las superficies de la carga.

#### **4.1.2 Recomendaciones**

Dado el alcance y los resultados obtenidos en este proyecto, se identificaron áreas en las que el diseño del horno podría ser mejorado. Las siguientes recomendaciones se basan en los análisis y resultados obtenidos con el objetivo de guiar futuros trabajos para mejorar la eficiencia térmica, minimizar las pérdidas de calor y explorar mejoras en el sistema de control para facilitar el proceso de cocción.

- Se identificó que la puerta del horno es la principal fuente de pérdida de calor debido a su material y diseño actual, por lo que se recomienda evaluar la posibilidad de mejorar el aislamiento de la puerta o rediseñar su sistema de cierre para minimizar estas fugas térmicas ya que implementar estas mejoras podría incrementar la eficiencia energética del horno y contribuir a una distribución de temperatura más uniforme en su interior.
- Se recomienda la construcción de un prototipo del horno utilizando los materiales seleccionados, con el fin de obtener datos experimentales que complementen y validen los resultados de las simulaciones, esto permitiría identificar posibles discrepancias entre la teoría y la práctica, proporcionando información valiosa para ajustar y optimizar el diseño final. Además, los datos obtenidos del prototipo ayudarían a refinar los cálculos de eficiencia térmica y pérdidas de calor.
- Para optimizar el sistema de transmisión y reducir el ruido generado por los engranajes, se recomienda considerar la implementación de bandas de transmisión en lugar de engranajes.

Las bandas, especialmente las bandas síncronas, tienen la capacidad de operar de manera más silenciosa y suave, lo que disminuye significativamente el ruido en el sistema. Además, las bandas ofrecen una mayor flexibilidad y pueden reducir las vibraciones y las cargas dinámicas en el sistema, lo que no solo contribuye a un ambiente de trabajo más silencioso, sino que también extiende la vida útil de los componentes involucrados. Invertir en este tipo de solución puede resultar en un sistema de transmisión más eficiente y confiable, especialmente en aplicaciones donde el control del ruido es crucial.

## Referencias

- [1] O. L. Arbelaez, "Medicion y Control," 2018. [En línea]. Disponible: <https://medicionycontrol.com.co/termocupla-tipo-k/#:~:text=Las%20termocuplas%20tipo%20K%20permiten,en%20diferentes%20tipos%20de%20sondas.>
- [2] BBVA, "Hornos eléctricos: cómo ahorrar en el consumo y la factura energética," Grupo BBVA, 22-ene-2024. [En línea]. Disponible: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/hornos-electricos-como-ahorrar-en-el-consumo-y-la-factura-energetica/>.
- [3] C. A. Elías, "Diseño e implementación de un prototipo de horno automatizado para el secado de granos de maíz con Arduino y control PID," Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú, 2022.
- [4] S. A. Giraldo, "Control PID de temperatura con Arduino," Control Automático Educación, 2021. [En línea]. Disponible: <https://controlautomaticoeducacion.com/arduino/control-pid-de-temperatura-con-arduino/>.
- [5] S. A. Giraldo, "Control PID acción proporcional," Control Automático Educación. [En línea]. Disponible: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/control-pid-accion-proporcional/>.
- [6] I. I. Juan, "Diseño e implementación de un sistema de control para motores de continua mediante un microcontrolador Arduino," Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2021.
- [7] "Tres emprendedores le ponen ruedas," Líderes, Quito. [En línea]. Disponible: <https://www.revistalideres.ec/lideres/tres-emprendedores-le-ponen-ruedas.html>.
- [8] M. J. Martínez Ramírez y J. D. Ramírez, "Diseño de sistemas de control embebidos PID por retroalimentación de estados y lógica difusa en plantas de temperatura y velocidad de motor DC para prácticas de laboratorio de control automático y microcontroladores," Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2023.
- [9] "Pizzería: iniciar," Modelos de Plan de Negocios, 2024. [En línea]. Disponible: <https://modelosdeplandenegocios.com/blogs/news/pizzeria-iniciar/>.
- [10] A. F. Moresi, "Performance characterization of a traditional wood-fired pizza oven," Food Science, vol. 87, 2022. [En línea]. Disponible: [https://www.researchgate.net/publication/362537933\\_Performance\\_characterization\\_of\\_a\\_traditional\\_wood-fired\\_pizza\\_oven/](https://www.researchgate.net/publication/362537933_Performance_characterization_of_a_traditional_wood-fired_pizza_oven/).

- [11] Nedgia, "Horno a gas vs eléctrico," Grupo Naturgy, 24-abr-2023. [En línea]. Disponible: <https://www.nedgia.es/blog-gas-natural/horno-gas-vs-electrico/#:~:text=Los%20hornos%20a%20gas%20natural%20son%20m%C3%A1s%20r%C3%A1pidos%20y%20eficientes,cocciones%20como%20pizzas%20y%20panes.>
- [12] "How and where was pizza invented," Pipazze. [En línea]. Disponible: <https://pipazze.es/en/how-and-where-was-pizza-invented/>.
- [13] SRC, "¿Qué es un sensor PT100?," SRC especialistas en regulación y control de temperatura. [En línea]. Disponible: <https://srctl.com/que-es-un-sensor-pt100/>.
- [14] "Who invented pizza? The history of 'za," Streets of New York, 30-abr-2021. [En línea]. Disponible: <https://www.streetsofnewyork.com/posts/who-invented-pizza-the-history-of-za.>

## **APÉNDICES**

## Apéndice A Tablas

**Tabla 2.5**

*Evaluación de los criterios del horno inteligente para pizza*

Rango > Precio > Durabilidad > Compacto > Fácil uso							
Criterio	Precio	Compacto	Durabilidad	Fácil uso	Rango	$\Sigma + 1$	Ponderación
Precio		1	0.5	1	0	3.5	0.233
Compacto	0		0.5	1	0	2.5	0.167
Durabilidad	0.5	0.5		1	0	3	0.200
Fácil uso	0	0	0		0	1	0.067
Rango	1	1	1	1		5	0.333
Suma						15	1

**Tabla 2.6**

*Evaluación de criterio, precio*

Solución A = Solución B > Solución C					
Precio	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0.5	1	2.5	0.417
Solución B	0.5		1	2.5	0.417
Solución C	0	0		1	0.167
Suma				6	1

**Tabla 2.7**

*Evaluación de criterio, compacto*

Solución B > Solución A = Solución C					
Compacto	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0	0.5	1.5	0.250
Solución B	1		1	3	0.500
Solución C	0.5	0		1.5	0.250
Suma				6	1

**Tabla 2.8**

*Evaluación de criterio, durabilidad*

Solución A > Solución B > Solución C					
Durabilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0.500
Solución B	0		1	2	0.333
Solución C	0	0		1	0.167
Suma				6	1

**Tabla 2.9***Evaluación de criterio, fácil uso*

Solución B > Solución A = Solución C					
Fácil uso	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0	0.5	1.5	0.250
Solución B	1		1	3	0.500
Solución C	0.5	0		1.5	0.250
Suma				6	1

**Tabla 2.10***Evaluación de criterio, rango*

Solución C > Solución A = Solución C					
Rango	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0.5	0	1.5	0.250
Solución B	0.5		0	1.5	0.250
Solución C	1	1		3	0.500
Suma				6	1.000

## Apéndice B

### Fichas técnicas

En este apéndice la información relevante de la hoja de datos de cada componente a utilizar en el diseño

HLK-5M05	
	100-240 Vac
Voltaje de salida	+5 Vdc
Máxima corriente de salida	1000 mA

Encoder 400 PPR	
Tensión de trabajo	5-24 Vdc
Velocidad mecánica máxima	5000 RPM
Temperatura de operación	25-105°C

Driver puente H BTS7960	
Tensión de trabajo	5.5-27 Vdc
Voltaje de control	3.3-5 Vdc
Capacidad de corriente	43A
Voltaje de tensión lógica	-0.3-5.3 Vdc

LCD 16X4	
Tensión de trabajo	5Vdc
Corriente de alimentación	1.65 mA

MAX6675	
Tensión de trabajo	5 Vdc
Temperatura de conversión	0-1024 °C
Bits de resolución	12

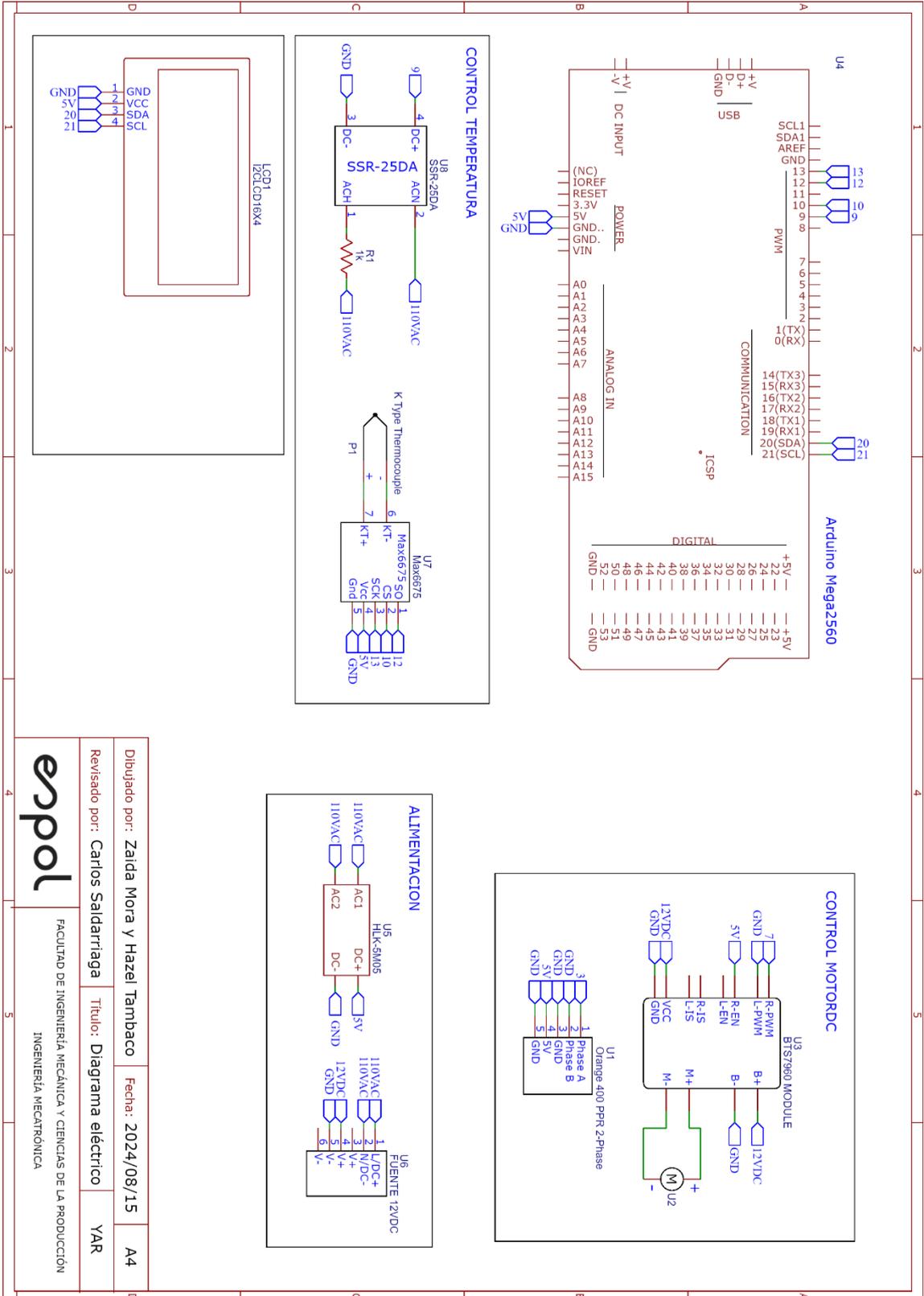
  

SSR-25DA	
Tensión de trabajo	24-380 Vac
Voltaje de control	3-32 Vdc
Corriente máxima de carga	25 A

# Apéndice C

## Diagrama esquemático del sistema

En este apéndice se presenta el diagrama esquemático del circuito del diseño del proyecto.



Dibujado por:	Zaida Mora y Hazel Tambaco	Fecha:	2024/08/15	A4
Revisado por:	Carlos Saldarriaga	Título:	Diagrama eléctrico	YAR
		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN INGENIERÍA MECATRÓNICA		

## Apéndice D

### Código para las pruebas de concepto del control de velocidad y de temperatura del sistema

En este apéndice se muestra dos códigos para la prueba de concepto de baja resolución del control de velocidad y de temperatura.

```
HISTERESIS
#include "max6675.h"
int thermoDO = 4;
int thermoCS = 5;
int thermoCLK = 6;
float sp = 32;
float bandaHisteresis = 2;
#define relay 2
MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  delay(250);
  pinMode(2, OUTPUT);
  digitalWrite(relay, LOW);
}
void loop()
{
  delay(100);
  float temp = thermocouple.readCelsius();
  Serial.println("SP: ");
  Serial.print(sp);
  Serial.print(",");
  Serial.print("temp: ");
  Serial.println(temp);
  if (temp > (sp + bandaHisteresis)) {
    digitalWrite(relay, LOW);
  }
  else if (temp < (sp - bandaHisteresis) ) {
    digitalWrite(relay, HIGH);
  }
  delay(1000);
}
```

```
float sp;
int PWM_salida = 7;
float pv;
int pinA = 3;
volatile int contador = 0;
unsigned long previousMillis = 0;
long interval = 100;
float cv;
float cv1;
float error;
float error1;
float error2;
float Kp = 1;
float Ki = 1;
float Kd = 0.01;
float Tm = 0.1;
void setup() {
  pinMode(pinA, INPUT);
  pinMode(PWM_salida, OUTPUT);
  Serial.begin(115200);
  attachInterrupt(1, interrupcion, RISING); //Flanco subida PIN 3
}
void loop() {
  unsigned long currentMillis = millis();
  if ((currentMillis - previousMillis) >= interval)
  {
    previousMillis = currentMillis;
    pv = 10*contador*(60.0/286.0);
    contador = 0;
  }
}
```

```

//---SET POINT----
sp = 70;
error = sp - pv;
//---ECUACION DE DIFERENCIAS---
cv = cv1 + (Kp + Kd/Tm)*error + (-Kp+ Ki*Tm - 2*Kd/Tm)*error1 + (Kd/Tm)*error2;
cv1 = cv;
error2 = error1;
error1 = error;
//---SATURAMOS LA SALIDA---
if (cv > 500) {
    cv = 500.0;
}
if (cv < 0) {
    cv = 30.0;
}
analogWrite(PWM_salida,cv*(255.0/500.0));
Serial.print("SP: ");
Serial.print(sp);
Serial.print(", ");
Serial.print("PV: ");
Serial.print(pv);
Serial.print(", ");
Serial.print("cv: ");
Serial.println(cv);
delay(100);
}
void interrupcion() {
    contador++;
}

```

## Apéndice E

### Código del horno

En este apéndice se presenta el código para el horno integrando la interfaz y sus respectivos controles.

```
/*
  CODIGO DEL MENU LCD CON EL TEMPORIZADOR
  SENSOR DE TEMPERATURA CON AMPLIFICADOR MAX6675
  MOTOR CON ENCODER
*/
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <LiquidMenu.h>
#include "Button.h"
#include "max6675.h"
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 4); // set the LCD address to 0x27 for a 16 chars and 2 line display
//-----Arduino Pins
const bool pullup = true;
Button but_scroll(10, pullup);
Button but_ok(11, pullup);
#define pot A0 //pot para el set point
int thermoDO = 4;
int thermoCS = 5;
int thermoCLK = 6;
float bandaHisteresis = 2;
#define relay 2
MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);
//-----Variables
bool estadoCoccion = false; // DEFINE SI ESTA EN ON/OFF LA COCCION
// uso para seleccionar
float potTemp = 0;
int potReadValueTemp = 0;
int potTiempo = 0;
int potReadValueTiempo = 0;
float setTemp = 0; //Temperatura
int setTiempo = 0; //Tiempo
int setVelocidad = 0; //Velocidad
// estado actual
float temperaturaActual = 0; //-----cambiar del final
//-----para el temporizador
long mil = 1000;
long seg = 60;
long inicioMillis = 0;
long setMillis = 0;
long millisTotal = 0;
//
long setMinutos = 0; // el unico del set
//
long segundosActual = 0;
long minutosActual = 0;
//
long valorSegundos = 0;
long banderaSegundos = 0;
long conteoSegundos = 0;
long conteoMinutos = 0;

bool estado = false;
static unsigned int period_check = 2000;
static unsigned long lastMs_check = 0;
//-----Constantes PID-----
float sp1; //set point del motor

int PWM_salida = 9;
float pv1; //Motor

int encoder = 3;
```

```

volatile int contador = 0;
unsigned long previousMillis = 0;
long interval = 100;

//Variables motor
float motor_cv;
float motor_cv1;
float motor_error;
float motor_error1;
float motor_error2;
//Constantes de controlador PID motor
float motor_Kp = 2;
float motor_Ki = 1;
float motor_Kd = 0.01;
float motor_Tm = 0.1;

//-----funcion para alcanzar set point del tiempo
void tiempoAlcanzado()
{
  millisTotal = inicioMillis + setMillis;
  if (millisTotal < (millis() + 5000))
  {
    estadoCoccion = false;
  }
}
void conteoTiempo(LiquidMenu menu)
{
  tiempoAlcanzado();
  if (setMinutos >= 1)
  {
    setMinutos = setMinutos - 1;
  }
  minutosActual = setMinutos; // para el print
  conteoSegundos = 60;
  while (conteoSegundos > 0 && estadoCoccion == true)
  {
    controlPID();
    controlTemp();
    valorSegundos = millis() / 1000; // segundo actuales desde que se encendió
    if (valorSegundos != banderaSegundos)
    {
      conteoSegundos = conteoSegundos - 1;
      segundosActual = conteoSegundos; // para el print
      // Serial.println(conteo);
      Serial.print(minutosActual);
      Serial.print(":");
      Serial.println(segundosActual);
      banderaSegundos = valorSegundos;
      menu.update();
    }
    buttonCheck();
  }
}

//-----Variables getter
float readPotTemp() // en la pantalla de seleccion de los set points
{
  potReadValueTemp = analogRead(pot);
  //potTemp = map(potReadValueTemp, 0, 1023, 300, 500); //Linea para diseño final
  potTemp = map(potReadValueTemp, 0, 1023, 25, 50); //Linea para prototipo de baja resolución
  return potTemp;
}
int readPotTiempo()
{
  potReadValueTiempo = analogRead(pot);
  potTiempo = map(potReadValueTiempo, 0, 1023, 0, 180);
}

```

```

return potTiempo;
}

//-----Config Menu LCD-----
// PANTALLA PRINCIPAL 1
LiquidLine linea1(1, 0, "Set temperatura");
LiquidLine linea2(1, 1, "Set tiempo");
LiquidLine linea3(-3, 2, "Set velocidad");
LiquidLine linea4(-3, 3, "Iniciar coccion");
LiquidScreen pantalla1(linea1, linea2, linea3, linea4);

// PANTALLA TEMPERATURA 2
LiquidLine linea1_2(1, 0, "Ajustar valor:");
LiquidLine linea2_2(1, 1, readPotTemp, " Celsius");
LiquidLine linea3_2(-3, 2, "Confirmar");
LiquidLine linea4_2(-3, 3, "Regresar");
LiquidScreen pantalla2(linea1_2, linea2_2, linea3_2, linea4_2);

// PANTALLA TIEMPO 3
LiquidLine linea1_3(1, 0, "Ajustar valor:");
LiquidLine linea2_3(1, 1, readPotTiempo, " min");
LiquidLine linea3_3(-3, 2, "Confirmar");
LiquidLine linea4_3(-3, 3, "Regresar");
LiquidScreen pantalla3(linea1_3, linea2_3, linea3_3, linea4_3);

// PANTALLA ROTACION 4
LiquidLine linea1_4(1, 0, "Velocidad:");
LiquidLine linea2_4(1, 1, "1");
LiquidLine linea3_4(-3, 2, "2");
LiquidLine linea4_4(-3, 3, "Regresar");
LiquidScreen pantalla4(linea1_4, linea2_4, linea3_4, linea4_4);

// PANTALLA COCCION 5
LiquidLine linea1_5(1, 0, "Temp: ", temperaturaActual);
LiquidLine linea2_5(1, 1, "Tiempo: ", minutosActual, ":", segundosActual);
LiquidLine linea3_5(-3, 2, "Finalizar");
LiquidScreen pantalla5(linea1_5, linea2_5, linea3_5);

LiquidMenu menu(lcd);

void encenderLED()
{
return;
}

void iniLCD()
{ //-----inicioLCD-----
lcd.init(); // initialize the lcd
lcd.init();
// Print a message to the LCD.
lcd.backlight();
delayMicroseconds(5000);
}

void menuPantalla()
{ //-----PANTALLAS-----
menu.init();

// Pantalla 1 - Pantalla principal
linea1.set_focusPosition(Position::LEFT);
linea2.set_focusPosition(Position::LEFT);
linea3.set_focusPosition(Position::LEFT);
linea4.set_focusPosition(Position::LEFT);

linea1.attach_function(1, irPantallaTemp);
linea2.attach_function(1, irPantallaTiempo);
linea3.attach_function(1, irPantallaRot);

```

```

linea4.attach_function(1, irPantallaCoccion);

menu.add_screen(pantalla1);

// Pantalla 2 - Configuracion temperatura
linea1_2.set_focusPosition(Position::LEFT);
linea2_2.set_focusPosition(Position::LEFT);
linea3_2.set_focusPosition(Position::LEFT);
linea4_2.set_focusPosition(Position::LEFT);

linea1_2.attach_function(1, encenderLED);
linea2_2.attach_function(1, encenderLED);
linea3_2.attach_function(1, selecSP);
linea4_2.attach_function(1, irPantallaInicio);

menu.add_screen(pantalla2);

// Pantalla 3 - Configuracion tiempo
linea1_3.set_focusPosition(Position::LEFT);
linea2_3.set_focusPosition(Position::LEFT);
linea3_3.set_focusPosition(Position::LEFT);
linea4_3.set_focusPosition(Position::LEFT);

linea1_3.attach_function(1, encenderLED);
linea2_3.attach_function(1, encenderLED);
linea3_3.attach_function(1, selecTiempo);
linea4_3.attach_function(1, irPantallaInicio);

menu.add_screen(pantalla3);

// Pantalla 4 - Configuracion velocidad
linea1_4.set_focusPosition(Position::LEFT);
linea2_4.set_focusPosition(Position::LEFT);
linea3_4.set_focusPosition(Position::LEFT);
linea4_4.set_focusPosition(Position::LEFT);

linea1_4.attach_function(1, encenderLED);
linea2_4.attach_function(1, selecVelocidad1);
linea3_4.attach_function(1, selecVelocidad2);
linea4_4.attach_function(1, irPantallaInicio);

menu.add_screen(pantalla4);

// Pantalla 5 - MONITOREO COCCION
linea1_5.set_focusPosition(Position::LEFT);
linea2_5.set_focusPosition(Position::LEFT);
linea3_5.set_focusPosition(Position::LEFT);

linea1_5.attach_function(1, encenderLED);
linea2_5.attach_function(1, encenderLED);
linea3_5.attach_function(1, finalizarProceso);

menu.add_screen(pantalla5);

pantalla1.set_displayLineCount(5);
pantalla2.set_displayLineCount(5);
pantalla3.set_displayLineCount(5);
pantalla4.set_displayLineCount(5);
pantalla5.set_displayLineCount(5);

menu.set_focusedLine(0);

menu.update();
}

//-----Funciones de cada linea-----
void irPantallaInicio()

```

```

{
  menu.change_screen(1);
  menu.set_focusedLine(0);
}

```

```

void irPantallaTemp()
{ // Config temperatura
  menu.change_screen(2);
  menu.set_focusedLine(0);
}

```

```

void irPantallaTiempo()
{ // Config tiempo
  menu.change_screen(3);
  menu.set_focusedLine(0);
}

```

```

void irPantallaRot()
{ // Config rotacion
  menu.change_screen(4);
  menu.set_focusedLine(0);
}

```

```

void irPantallaCoccion()
{ // Pantalla de monitoreo de coccion
  if (setTemp!=0 && setTiempo!=0 && setVelocidad!=0) {
    estadoCoccion = true;
    menu.change_screen(5);
    menu.set_focusedLine(0);
    //
    setMinutos = setTiempo;
    conteoMinutos = setMinutos; // debe estar en el setup
    setMillis = mil * seg * setMinutos; // Milisegundos que quiero contar
    inicioMillis = millis();
  } else {
    menu.set_focusedLine(0);
  }
}

```

```

void finalizarProceso()
{
  estadoCoccion = false;
  setTemp = 0;
  setTiempo = 0;
  setVelocidad = 0;
  analogWrite(PWM_salida, 0);
  menu.change_screen(1);
  menu.set_focusedLine(0);
}

```

```

void selecSP()
{ // -----SET POINT TEMPERATURA-----
  // Seleccion del Set Point
  setTemp = potTemp;
  Serial.println(setTemp);
  menu.change_screen(1);
  menu.set_focusedLine(0);
}

```

```

void selecTiempo()
{ // -----SET POINT TIEMPO-----
  // Seleccion del Set Point
  setTiempo = potTiempo; // en minutos
  Serial.println(setTiempo);
  menu.change_screen(1);
  menu.set_focusedLine(0);
}

```

```

void selecVelocidad1()
{ //-----SET POINT TIEMPO-----
  //Seleccion de la velocidad
  setVelocidad = 40; // RPM
  Serial.println(setVelocidad);
  menu.change_screen(1);
  menu.set_focusedLine(0);
}

void selecVelocidad2()
{ //-----SET POINT TIEMPO-----
  //Seleccion de la velocidad
  setVelocidad = 150; // RPM
  Serial.println(setVelocidad);
  menu.change_screen(1);
  menu.set_focusedLine(0);
}

void buttonCheck()
{
  if (but_scroll.check() == LOW)
  {
    menu.switch_focus();
  }
  if (but_ok.check() == LOW)
  {
    menu.call_function(1);
  }
  // if (but_back.check() == LOW) {
  //   menu.change_screen(1);
  // }
}

//-----CONTROL PID-----
void controlPID() {
  unsigned long currentMillis = millis();
  if ((currentMillis - previousMillis) >= interval)
  {
    previousMillis = currentMillis;
    pv1 = 10 * contador * (40.0 / 374.0); //motor
    contador = 0;
  }
  //---DEFINIR LOS SET POINT---
  sp1 = setVelocidad;
  motor_error = sp1 - pv1;

  //---ECUACION DE DIFERENCIAS---
  motor_cv = motor_cv1 + (motor_Kp + motor_Kd / motor_Tm) * motor_error + (-motor_Kp + motor_Ki * motor_Tm - 2 * motor_Kd /
  motor_Tm) * motor_error1 + (motor_Kd / motor_Tm) * motor_error2;
  motor_cv1 = motor_cv;
  motor_error2 = motor_error1;
  motor_error1 = motor_error;

  //---SATURAMOS LA SALIDA---
  if (motor_cv > 500) {
    motor_cv = 500.0;
  }
  if (motor_cv < 0) {
    motor_cv = 0;
  }

  analogWrite(PWM_salida, motor_cv * (255.0 / 500.0));
  Serial.print("SP_motor: ");
  Serial.print(sp1);
  Serial.print("PV_motor: ");
  Serial.println(pv1);
}

```

```

}

void controlTemp() {

    float temp = thermocouple.readCelsius();
    temperaturaActual = temp;
    Serial.println("SP: ");
    Serial.print(setTemp);
    Serial.print(",");
    Serial.print("temp: ");
    Serial.println(temp);
    if (temp > (setTemp + bandaHisteresis)) {
        digitalWrite(relay, LOW);
    }
    else if (temp < (setTemp - bandaHisteresis)) {
        digitalWrite(relay, HIGH);
    }
}

void interrupcion() {
    contador++;
}

void setup()
{
    //Sensores
    pinMode(encoder, INPUT);
    pinMode(2, OUTPUT);
    digitalWrite(relay, LOW);
    //Actuador
    pinMode(PWM_salida, OUTPUT);
    digitalWrite(relay, LOW);
    attachInterrupt(1, interrupcion, RISING);
    Serial.begin(115200);
    pinMode(pot, INPUT);
    iniLCD();
    menuPantalla();
    estadoCoccion = false; // revisar si es necesario
    Serial.println("FINALIZA EL SET UP");
}

void loop()
{
    if (millis() - lastMs_check > period_check)
    {
        lastMs_check = millis();
        // poner dentro del elseif el llamado a la funcion IR PANTALLA PREGUNTA SALIR
        if (estadoCoccion)
        {
            conteoTiempo(menu);
        }
        else if (estadoCoccion == false)
        {
            Serial.println("TERMINO");
            digitalWrite(relay, false);
        }
        menu.update();
    }
    buttonCheck();
}

```

## Apéndice F

### Código para el modelado y sintonización del motor

En este apéndice se presenta el código utilizado para el modelado y obtener el controlador del motor seleccionado para el diseño del proyecto.

```
M1135244.m x +
1      clc
2      clear all
3      close all
4
5      %% Modelo matemático del motor DC -- GEARMOTOR
6      %M1135244
7      %Parametros del motor
8      Va = 12; %Tensión nominal [V]
9      Rm = 0.053; %Resistencia terminal [Ohms]
10     Lm = 0.00012; %Inductancia del rotor [H]
11     Jm = 0.0001885; %Inercia nominal [Kgm^2]
12     kt = 3.908 %Constante de voltaje [V/1000rpm]
13     ke = 0.0373; %Constante de torque [Nm/A]
14     Ia = 21; %Corriente del motor sin carga [A]
15
16     %Cálculo de b
17     K = ke;
18     Wr = (Va-(Rm*Ia))/ke;
19     Te = ke*Ia;
20     B = Te/Wr;
21
22     a1 = K/(Lm*Jm);
23     b1 = ((Rm*Jm)+(Lm*B))/(Lm*Jm);
24     c1 = ((Rm*B)+(K^2))/(Lm*Jm);
25
26     % Funcion TF
27     P=tf(a1,[1 b1 c1]);
28     figure
29     step(P)
30     legend('Modelo del motor DC');
31     title("Respuesta a un escalón unitario")
32     xlabel('tiempo (seg)');
33     ylabel("Velocidad (rad/s)");
34     grid()
35     %damp(P)
36
37     %% Aumento del sistema de transmisión para aumentar el torque del motor
38     % N relación de transmisión se seleccionó de 58:1
39     Ntrans = 58;
40     nefic = 0.9;
41
42     a1 = (K*Ntrans*nefic)/(Lm*Jm*Ntrans^2);
43     b1 = ((Rm*Jm)+(Lm*B))/(Lm*Jm);
44     c1 = ((Rm*B)+(K^2)*nefic)/(Lm*Jm);
45
46     % Funcion TF
47     P=tf(a1,[1 b1 c1]);
48     figure
49     step(P)
50     legend('Modelo del motor DC con caja de engranajes');
51     title("Respuesta a un escalón unitario")
52     xlabel('tiempo (seg)');
53     ylabel("Velocidad (rad/s)");
54     grid()
55     %damp(P)
56
57     %% Sintonización controlador PID - Método por Asignación de polos
58
59     %Obtiene el numerador y denominador de la FT
60     [n,d]=tfdata(P,'v');
```

```

61 L=P.iodelay;
62 k=n(3);
63 a=d(2);
64 b=d(3);
65
66 % Especificaciones de Diseño
67 Mp=5; %Maximo Pico
68 ep=sqrt(((log(Mp/100))^2)/(pi^2+((log(Mp/100))^2)));
69 tau=1/(abs(max(roots(d)))); %Toma el valor del polo dominante
70 Tss=(tau*4)*0.75;
71 Wn=4/(ep*Tss);
72
73 Sd=[-ep*Wn+1i*Wn*sqrt(1-ep^2), -ep*Wn-1i*Wn*sqrt(1-ep^2)];
74 p3=real(Sd(1))*10;
75 Sd1=[Sd p3];
76 Pds=poly(Sd1);
77
78 disP = 10; %Distancia del polo
79 %Evita ganancias negativas (usar si la ganancia de la planta es positiva)
80 if(dcgain(P)>0)
81     while(Pds(3)-b < 0 || Pds(4)<0 || Pds(2)-a<0)
82         disP = disP+1;
83         p3=real(Sd(1))*disP;
84         Sd1=[Sd p3];
85         Pds=poly(Sd1);
86     end
87     disp('Distancia del polo insignificante:')
88     disP;
89 end
90
91 alpha=0.01;
92
93 %Calculo del Controlador
94 Kc=(Pds(3)-b)/k;
95 ti=(k*Kc)/Pds(4);
96 td=(Pds(2)-a)/(k*Kc);
97 Ki=Kc/ti;
98 Kd=Kc*td;
99
100 %Parametros del PID con Filtro en el termino Derivativo
101 d2=alpha*Kc*ti*td+Kc*ti*td;
102 d1=Kc*ti+alpha*Kc*td;
103 d0=Kc;
104
105 %Controlador PID
106 C=tf([d2 d1 d0],[alpha*ti*td ti 0]);
107 N=1/(td*alpha);
108
109 %% Resultado planta+controlador PID en tiempo continuo
110
111 %Simulación con el Modelo en lazo cerrado
112 H=minreal((C*P)/(1+C*P));
113 figure
114 figure
115 step(H);
116 legend('Sistema con controlador PID en tiempo continuo');
117 title("Respuesta a un escalón unitario")
118 xlabel('tiempo (seg)');
119 ylabel("Velocidad (rad/s)");
120 grid()
121
122 % Simulación del Controlador PID Discreto
123 % Parámetros de la Simulación
124 Ts = 0.001; % Periodo de muestreo en segundos (10 ms)
125 Hd = c2d(H,Ts,'zoh');
126 step(H,Hd)
127 % Graficar las respuestas
128 legend('Sistema Continuo', 'Sistema Discreto');
129 title('Respuesta al escalón del sistema continuo y discreto');
130 xlabel('tiempo (seg)');
131 ylabel("Velocidad (rad/s)");
132 grid()

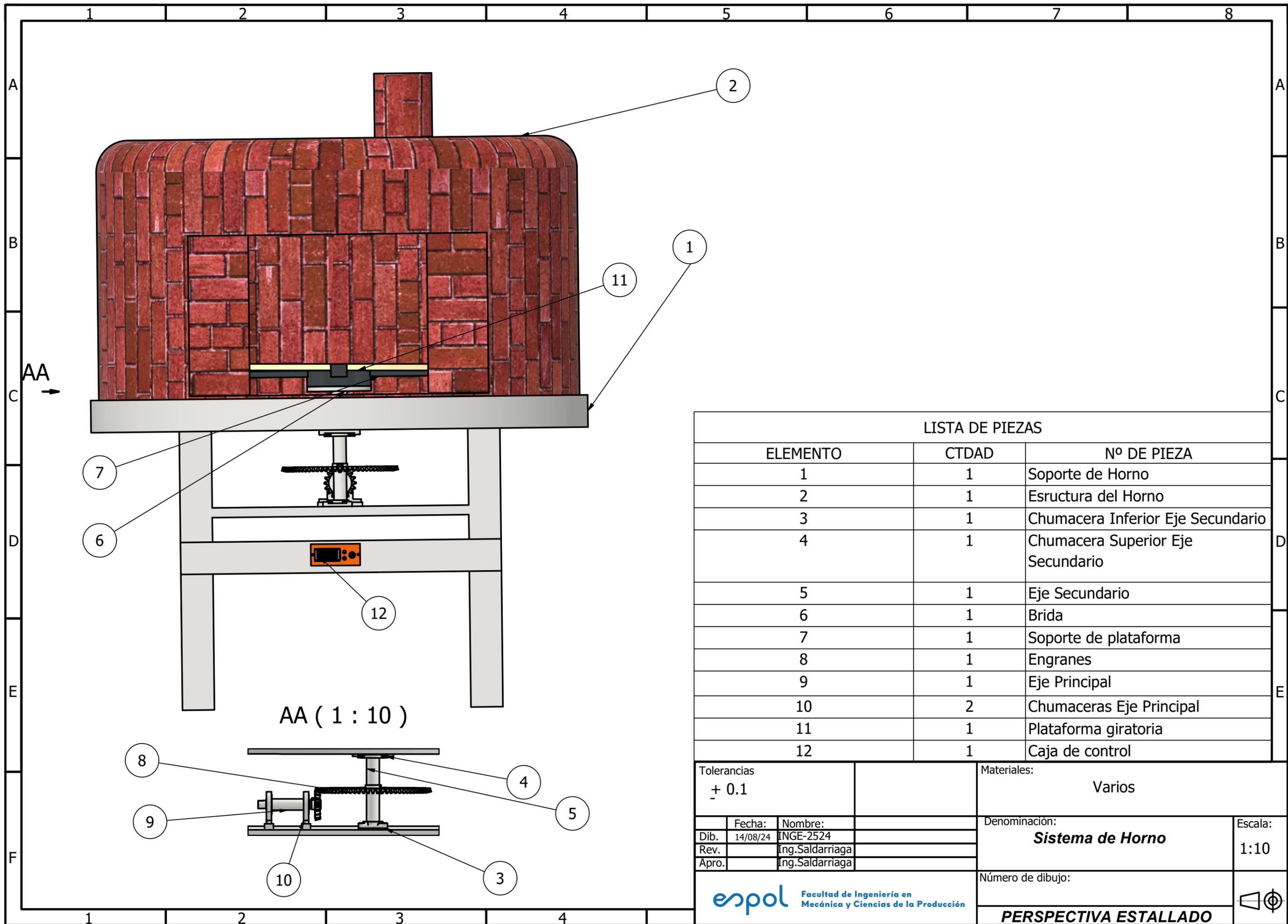
```

```
132
133 %% Simulación del modelo del motor
134
135 % Parámetros de la Simulación
136 Ts = 0.001; % Periodo de muestreo en segundos (10 ms)
137 Pd = c2d(P,Ts,'zoh');
138 step(P,Pd)
139 % Graficar las respuestas
140 legend('Modelo del motor DC con caja de engranajes en tiempo continuo', ...
141        'Modelo del motor DC con caja de engranajes en tiempo discreto');
142 title('Respuesta al escalón del sistema continuo y discreto');
143 xlabel('tiempo (seg)');
144 ylabel("Velocidad (rad/s)");
145 grid()
146
```

## **Apéndice G**

### **Planos de piezas mecánicas y ensamblaje**

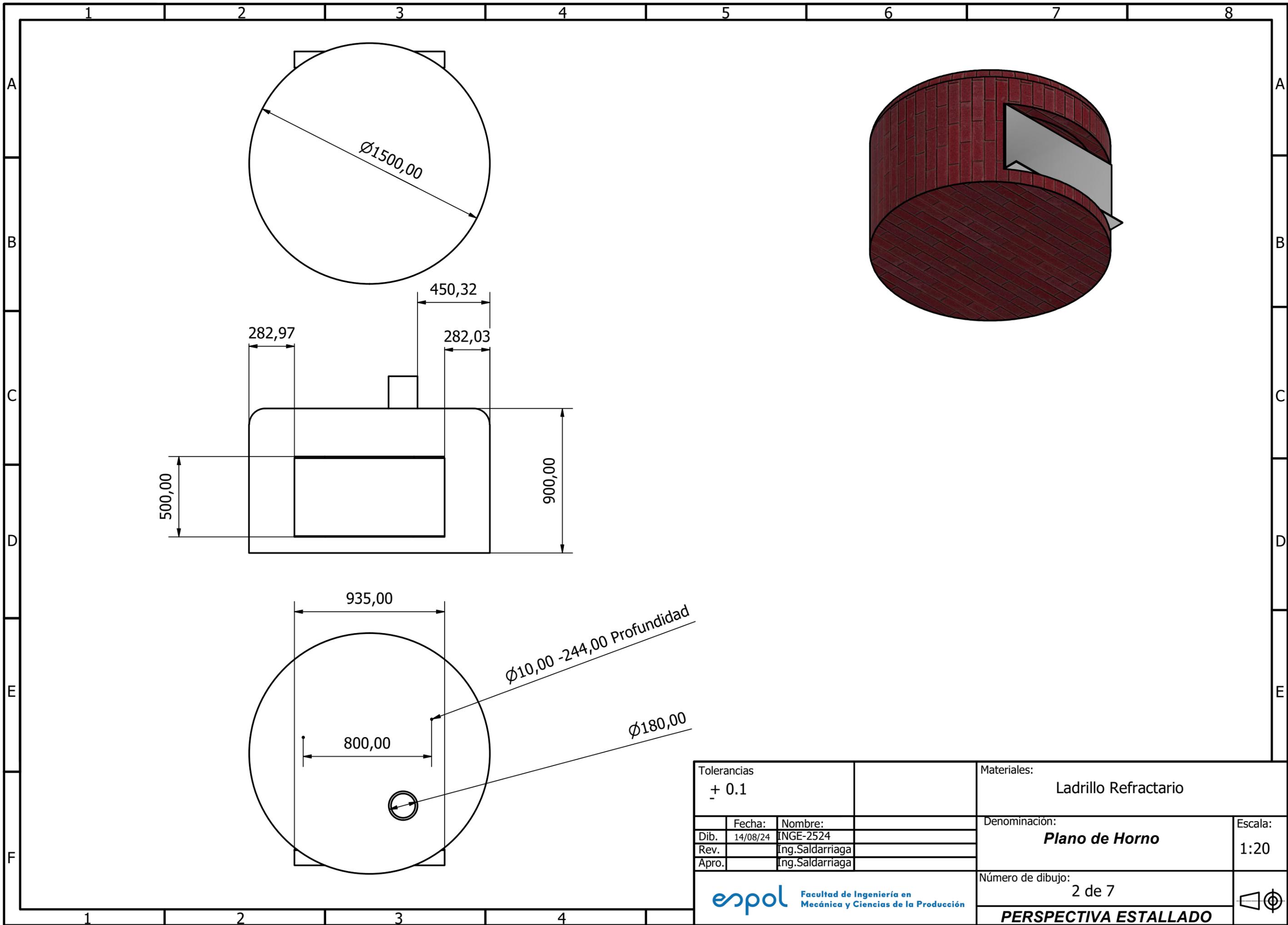
En este apéndice se presentan los planos mecánicos de cada pieza del proyecto modelada en Inventor, los ensambles relevantes y el final del diseño del horno.



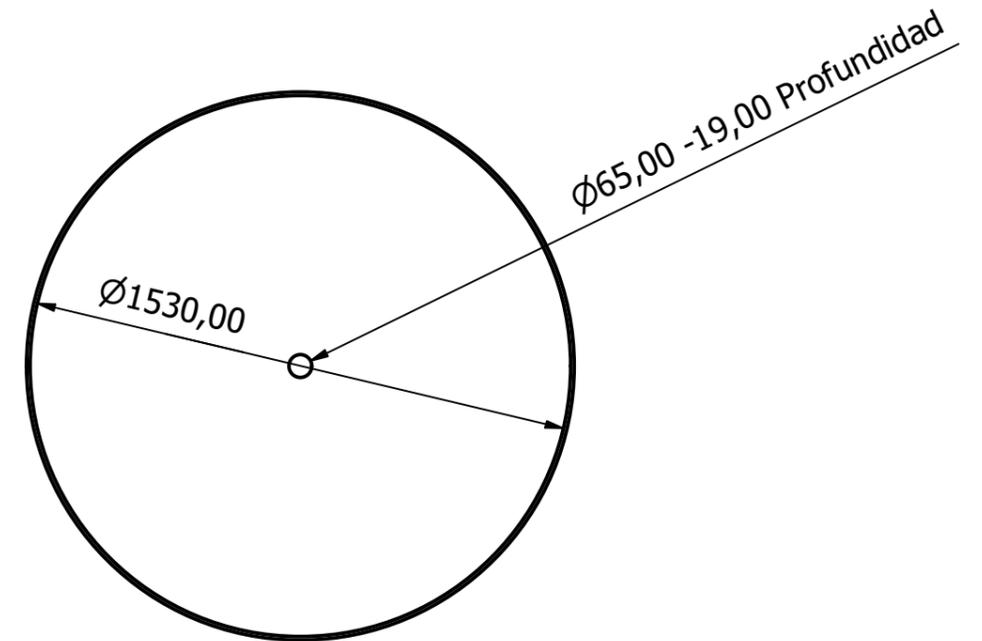
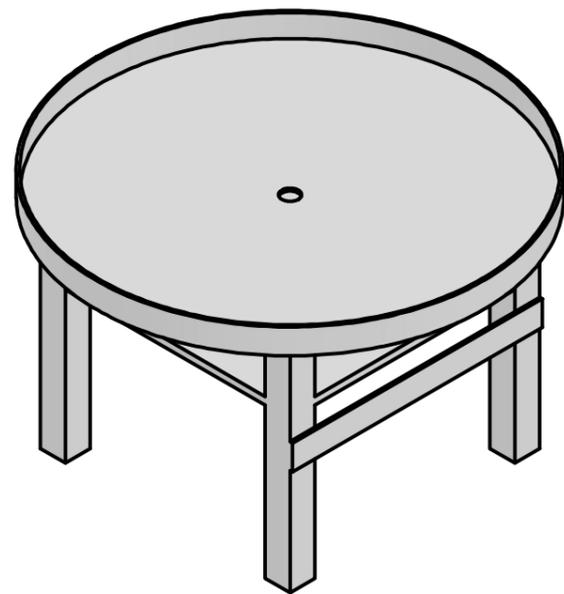
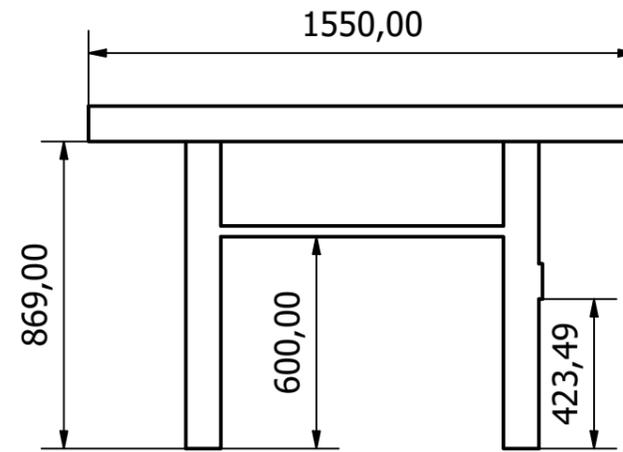
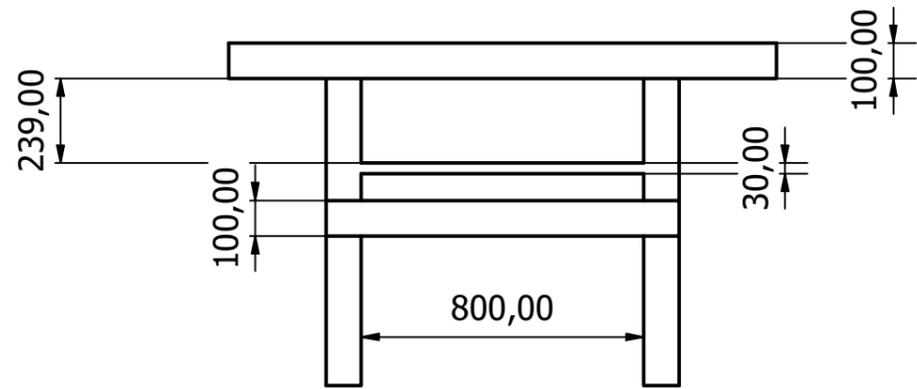
LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Soporte de Horno
2	1	Esruectura del Horno
3	1	Chumacera Inferior Eje Secundario
4	1	Chumacera Superior Eje Secundario
5	1	Eje Secundario
6	1	Brida
7	1	Soporte de plataforma
8	1	Engranés
9	1	Eje Principal
10	2	Chumaceras Eje Principal
11	1	Plataforma giratoria
12	1	Caja de control

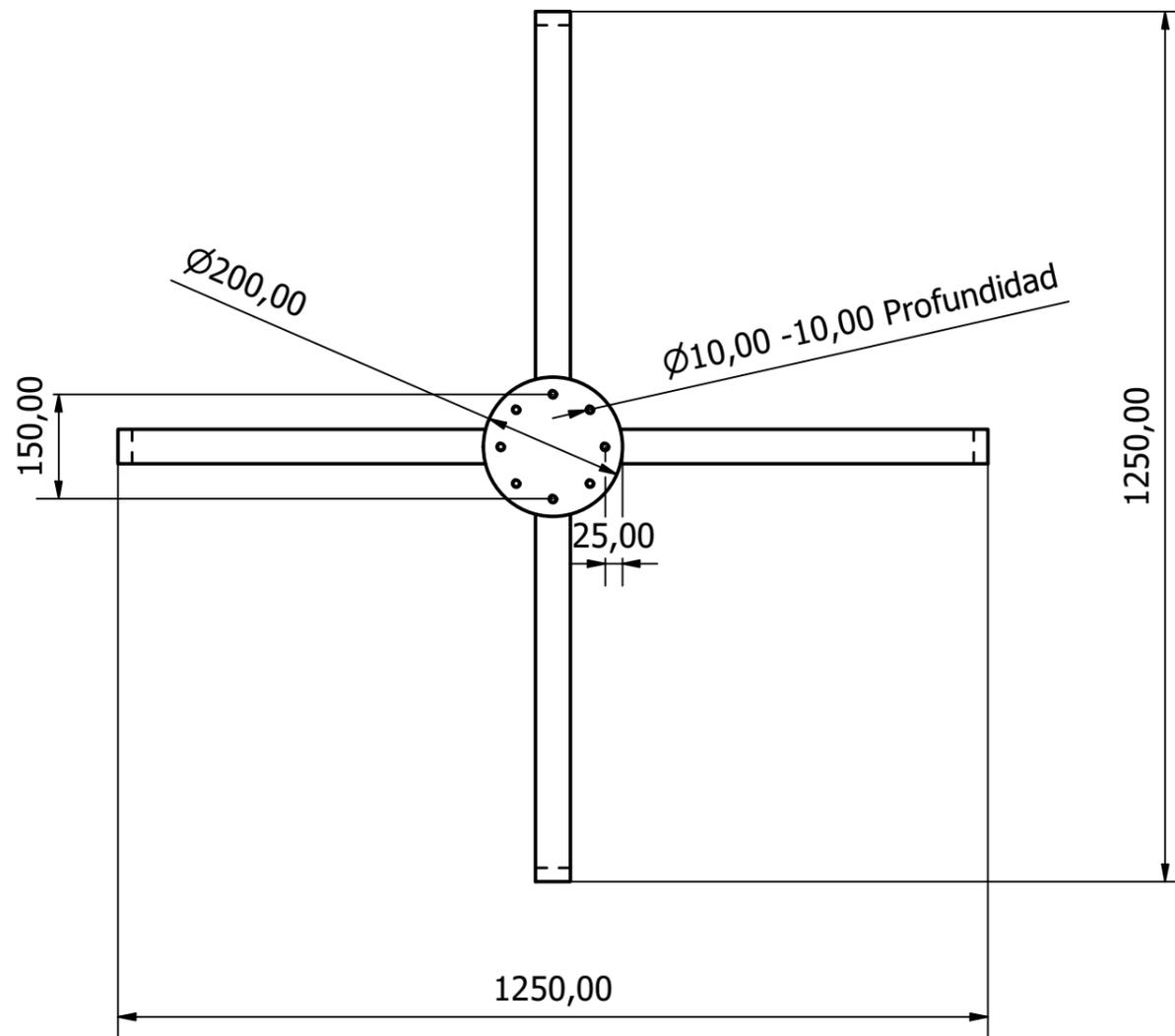
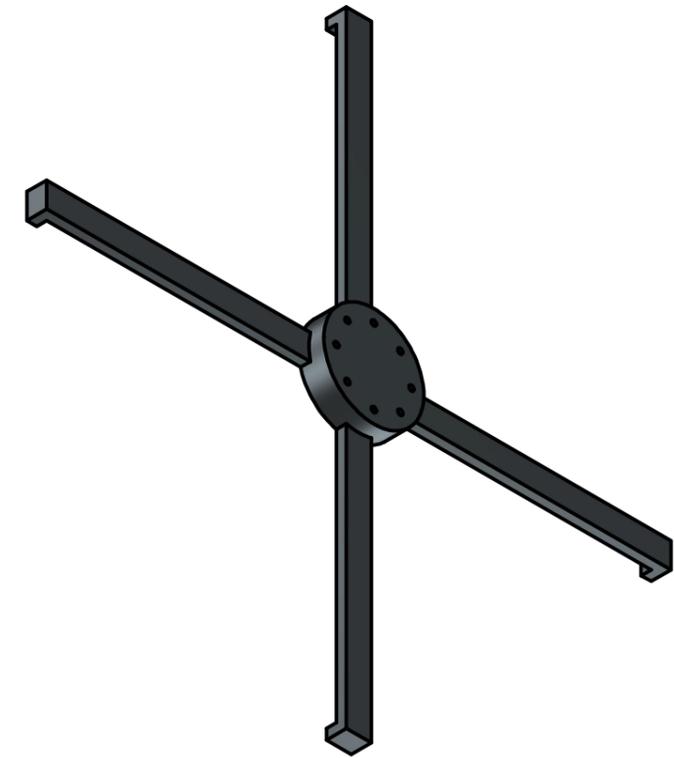
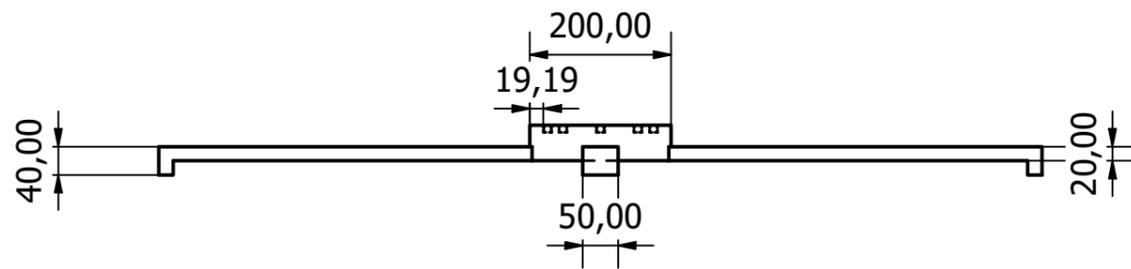
Tolerancias + 0.1 - 0.1		Materiales: Varios	
Fecha: 14/08/24	Nombre: INGE-2524	Denominación: <b>Sistema de Horno</b>	Escala: 1:10
Rev.	Ing.Saldarriaga		
Apro.	Ing.Saldarriaga		
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción		Número de dibujo:	
		<b>PERSPECTIVA ESTALLADO</b>	



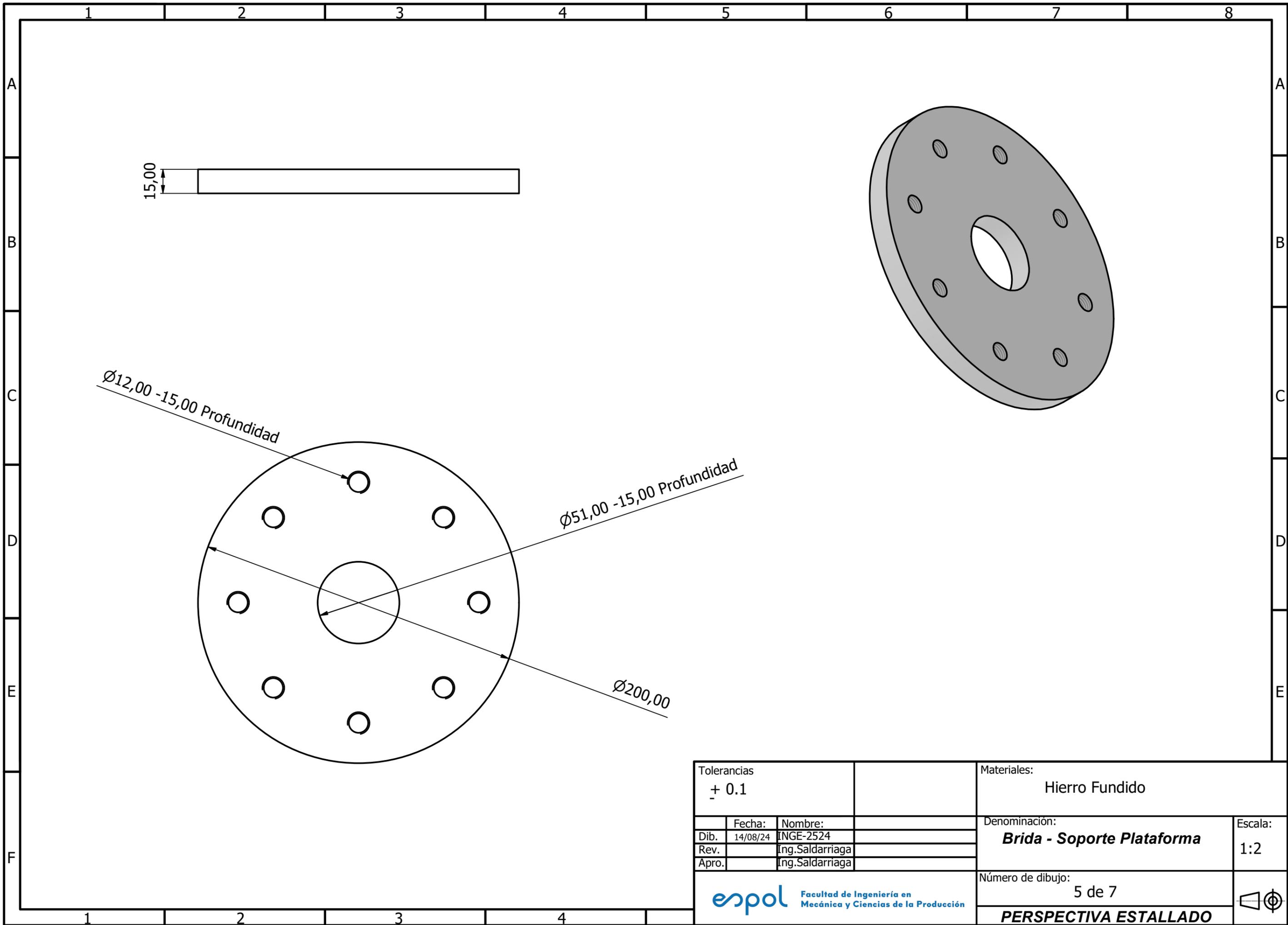
Tolerancias $\pm 0.1$		Materiales: Ladrillo Refractario	
Dib.	Fecha: 14/08/24	Nombre: INGE-2524	Denominación: <b>Plano de Horno</b>
Rev.		Ing.Saldarriaga	Escala: 1:20
Apro.		Ing.Saldarriaga	Número de dibujo: 2 de 7
			<b>PERSPECTIVA ESTALLADO</b>



Tolerancias $\pm 0.1$		Materiales: Acero ASTM A36	
Dib.	Fecha: 14/08/24	Nombre: INGE-2524	Denominación: <b>Soporte de horno</b>
Rev.		Ing.Saldarriaga	Escala: 1:20
Apro.		Ing.Saldarriaga	Número de dibujo: 3 de 7
<b>PERSPECTIVA ESTALLADO</b>			



Tolerancias $\pm 0.1$		Materiales: Hierro Fundido	
Dib.	Fecha: 14/08/24	Nombre: INGE-2524	Denominación: <b>Soporte de plataforma giratoria</b>
Rev.		Ing.Saldarriaga	Escala: 1:10
Apro.		Ing.Saldarriaga	Número de dibujo: 4 de 7
<b>PERSPECTIVA ESTALLADO</b>			



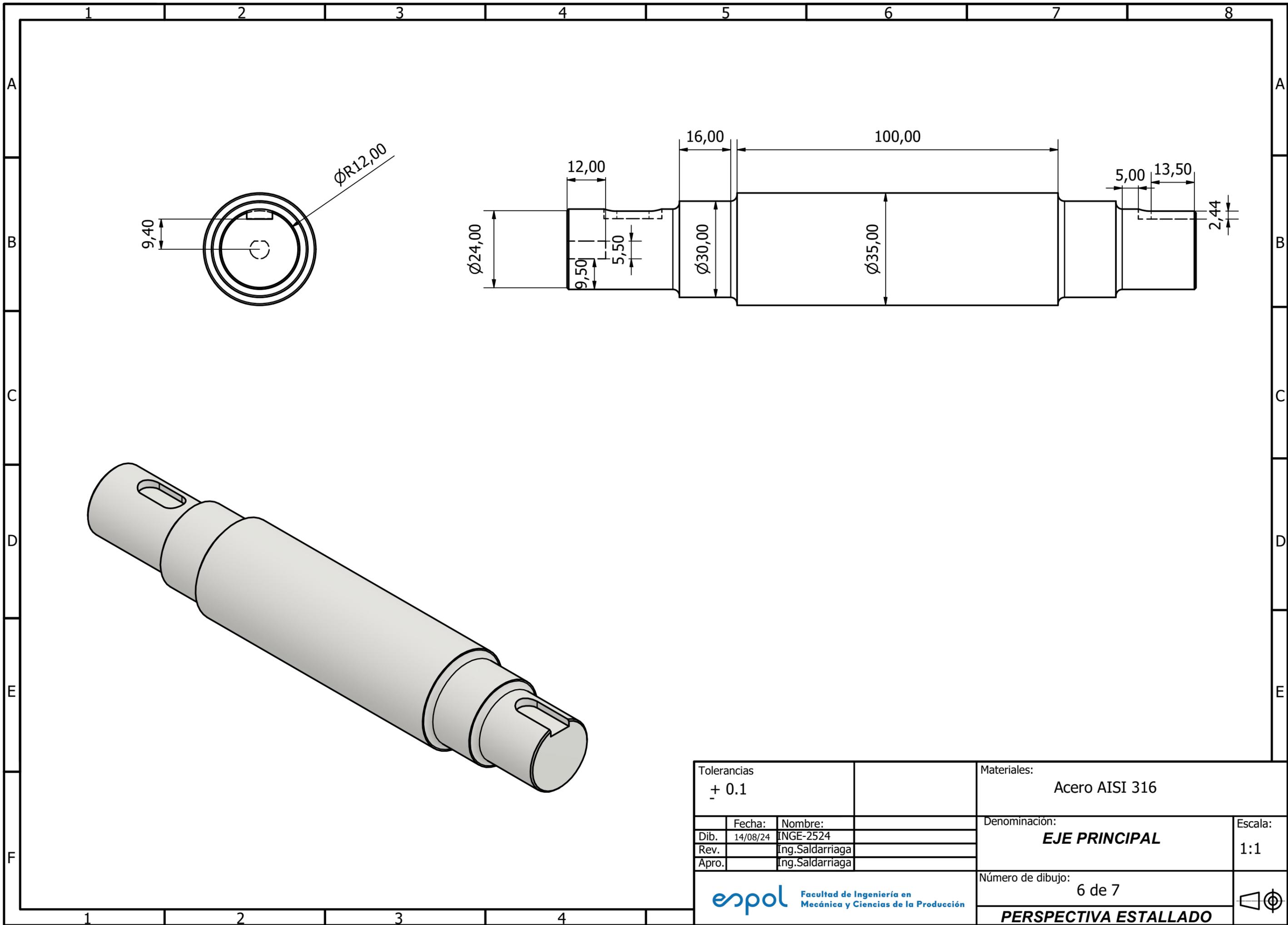
15,00

Ø12,00 -15,00 Profundidad

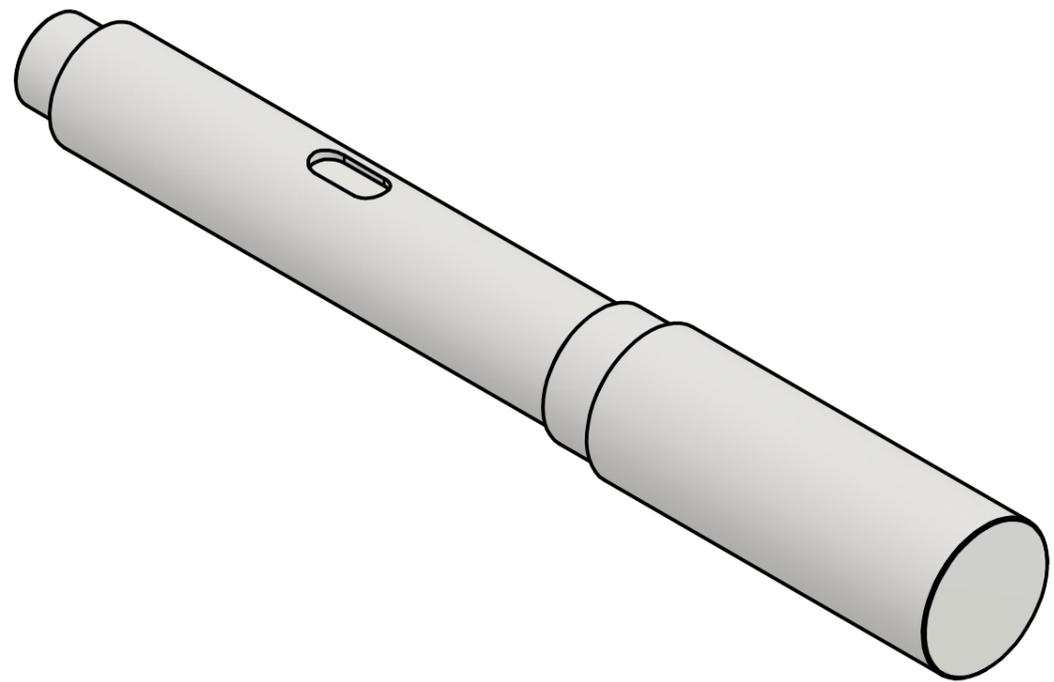
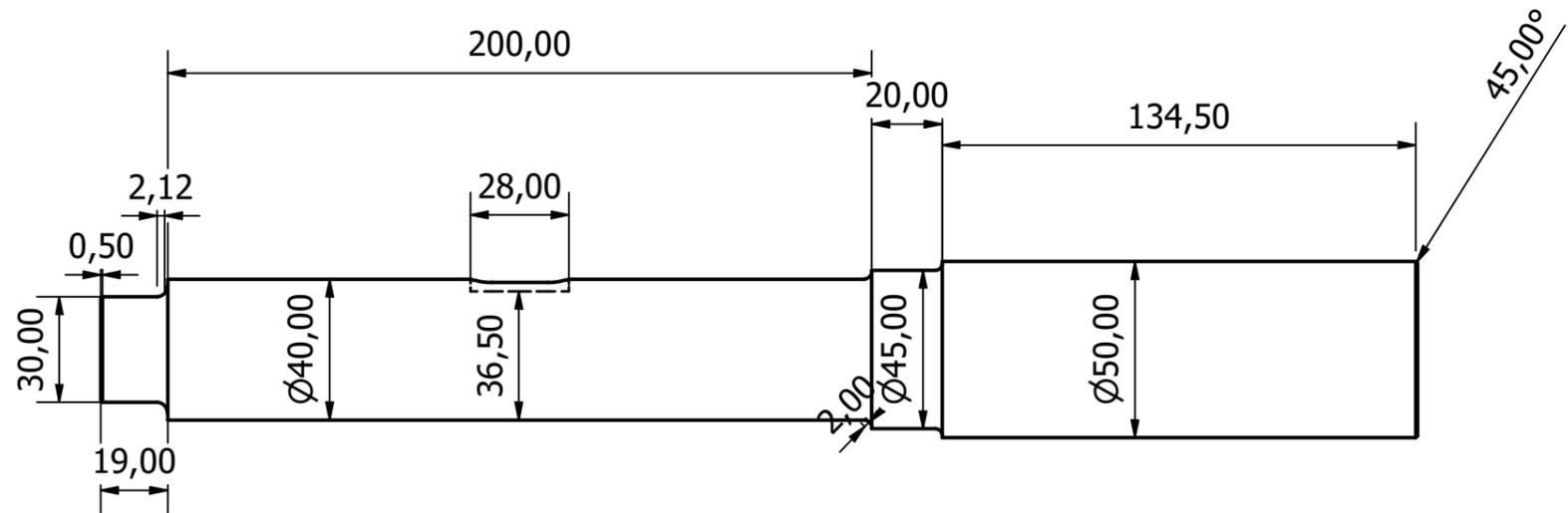
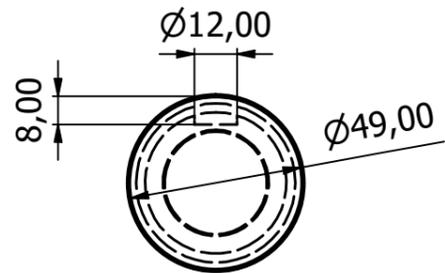
Ø51,00 -15,00 Profundidad

Ø200,00

Tolerancias + 0.1 - 0.1		Materiales: Hierro Fundido	
Dib.	Fecha: 14/08/24	Nombre: INGE-2524	Denominación: <b>Brida - Soporte Plataforma</b>
Rev.		Ing.Saldarriaga	Escala: 1:2
Apro.		Ing.Saldarriaga	Número de dibujo: 5 de 7
			<b>PERSPECTIVA ESTALLADO</b>



Tolerancias $\pm 0.1$		Materiales: Acero AISI 316	
Dib.	Fecha: 14/08/24	Nombre: INGE-2524	Denominación: <b>EJE PRINCIPAL</b>
Rev.		Ing.Saldarriaga	Escala: 1:1
Apro.		Ing.Saldarriaga	Número de dibujo: 6 de 7
 Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción			 <b>PERSPECTIVA ESTALLADO</b>



Tolerancias + 0.1 - 0.1		Materiales: Acero AISI 316		
Dib.	Fecha: 14/08/24	Nombre: INGE-2524	Denominación: <b>EJE SECUNDARIO</b>	Escala: 1:2
Rev.		Ing.Saldarriaga		
Apro.		Ing.Saldarriaga		
			Número de dibujo: 7 de 7	
<b>PERSPECTIVA ESTALLADO</b>				