



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**DISEÑO DE UN HORNO PARA PROCESOS DE TRATAMIENTOS  
TÉRMICOS EN LA EMPRESA FIBROACERO S.A.**

Trabajo de titulación previo a la obtención  
del título de Ingeniero Mecatrónico

AUTORES: PEDRO ISRAEL JARAMILLO CARRASCO  
PEDRO ANDRÉS PERALTA RUBIO

TUTOR: ING. MARCO ESTEBAN AMAYA PINOS, MSc.

CO-TUTOR: ING. ANGEL EUGENIO CARDENAS CADME, MSc.

Cuenca – Ecuador

2022

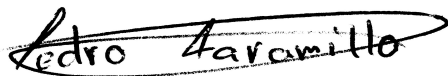
# CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Pedro Isarel Jaramillo Carrasco con documento de identificación N° 0105501266 y Pedro Andrés Peralta Rubio con documento de identificación N° 0105322309; manifestamos que:

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

Cuenca, 31 de julio del 2022

Atentamente,



---

**Pedro Israel Jaramillo Carrasco**  
**0105501266**



---

**Pedro Andrés Peralta Rubio**  
**0105322309**

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

Nosotros, Pedro Isarel Jaramillo Carrasco con documento de identificación N° 0105501266 y Pedro Andrés Peralta Rubio con documento de identificación N° 0105322309, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: "Diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecatrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Cuenca, 31 de julio del 2022

Atentamente,



---

**Pedro Isarel Jaramillo Carrasco**  
**0105501266**



---

**Pedro Andrés Peralta Rubio**  
**0105322309**

# **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Marco Esteban Amaya Pinos con documento de identificación N° 0102263480, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN HORNO PARA PROCESOS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN LA EMPRESA FIBROACERO S.A., realizado por Pedro Isarel Jaramillo Carrasco con documento de identificación N° 0105501266 y Pedro Andrés Peralta Rubio con documento de identificación N° 0105322309, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 31 de julio del 2022

Atentamente,



**Ing. Marco Esteban Amaya Pinos, MSc**  
**0102263480**

# **Agradecimientos**

## ***Pedro Israel***

Agradezco a mis padres quienes me apoyaron incondicionalmente en todo mi trayecto universitario y formación personal a lo largo de mi vida.

Agradezco al Ing. Marco Amaya por su orientación que permitió la realización de este trabajo de titulación, así como al Ing. Eugenio Cárdenas por su apoyo y guía.

## ***Pedro Andrés***

En primer lugar, agradezco a mis padres, por apoyarme en todos los aspectos de mi vida y en el seguimiento de mis estudios.

Al Ing. Marco Amaya, por el apoyo y su guía para la realización de este trabajo de culminación de carrera, a su vez al Ing. Eugenio Cárdenas nuestro cotutor, que nos brindó su apoyo y su seguimiento.

Este documento fue realizado enteramente en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

# Índice

<b>Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación</b>	<b>I</b>
<b>Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana</b>	<b>II</b>
<b>Certificado de dirección del trabajo de titulación</b>	<b>III</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>IV</b>
<b>Resumen</b>	<b>XII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Problema</b>	<b>1</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	1
2.2. Descripción del problema . . . . .	2
2.3. Importancia y alcances . . . . .	2
2.4. Delimitación . . . . .	3
2.4.1. Espacial o geográfica . . . . .	3
2.4.2. Temporal . . . . .	3
2.4.3. Sectorial o institucional . . . . .	3
2.5. Problema General . . . . .	3
2.6. Problemas Específicos . . . . .	3
<b>3. Objetivos</b>	<b>4</b>
3.1. Objetivo General . . . . .	4
3.2. Objetivos Específicos . . . . .	4
<b>4. Hipótesis</b>	<b>4</b>
4.1. Hipótesis General . . . . .	4
4.2. Hipótesis Específicas . . . . .	4
<b>5. Matriz de Consistencia Lógica</b>	<b>5</b>

<b>6. Marco Teórico</b>	<b>6</b>
6.1. Diseño . . . . .	6
6.2. Temple . . . . .	8
6.3. Controladores . . . . .	10
6.4. Termodinámica . . . . .	11
6.4.1. Sistemas cerrados y abiertos . . . . .	12
6.4.2. Propiedades de un sistema . . . . .	13
6.5. Transferencia de calor . . . . .	13
6.5.1. Conductividad térmica . . . . .	14
6.5.2. Transferencia de la energía . . . . .	14
6.5.3. Mecanismos de transferencia de calor . . . . .	14
6.6. Aislamiento térmico . . . . .	15
6.7. Método por elementos finitos . . . . .	16
6.7.1. Funciones de forma . . . . .	16
6.7.2. Sistema discreto . . . . .	17
6.7.3. Sistema continuo . . . . .	17
<b>7. Marco metodológico</b>	<b>17</b>
7.1. Identificación los parámetros iniciales para el diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A. . . . .	17
7.1.1. Espacio físico . . . . .	17
7.1.2. Dimensiones de las piezas . . . . .	18
7.1.3. Materiales de las piezas a ser tratadas térmicamente . . . . .	19
7.1.4. Medidas antropométricas del operario . . . . .	20
7.1.5. Dimensiones generales del horno . . . . .	20
7.2. Desarrollo del sistema mecánico, de control y el modelo matemático de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A. . . . .	20
7.2.1. Propuestas del diseño mecánico del horno . . . . .	20
7.2.2. Dimensionamiento del espesor de las paredes del horno . . . . .	24
7.2.3. Cálculo de pérdidas de calor . . . . .	29
7.2.4. Cálculo de la potencia del horno . . . . .	41
7.2.5. Tiempo de calentamiento . . . . .	42
7.2.6. Elementos resistivos . . . . .	42
7.2.7. Sistema de mando y potencia . . . . .	47
7.2.8. Sistema de control . . . . .	51



7.3.	Evaluación del diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A. . . . . .	58
7.3.1.	Análisis de flujo de calor constante analítico y simulado . . . . .	58
7.3.2.	Análisis de razón de transferencia de calor . . . . .	63
7.3.3.	Análisis estructural de la mesa de soporte . . . . .	65
7.3.4.	Análisis estructural de las bisagras de la puerta . . . . .	71
<b>8.</b>	<b>Resultados</b>	<b>74</b>
8.1.	Identificación los parámetros iniciales para el diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A. . . . . .	74
8.2.	Desarrollo del sistema mecánico, de control y el modelo matemático de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.	74
8.3.	Evaluación del diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A. . . . . .	77
<b>9.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>79</b>
<b>10.</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>80</b>
	<b>Referencias</b>	<b>82</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>83</b>

## Lista de Tablas

1.	Matriz de consistencia lógica. . . . .	5
2.	Dimensiones de las piezas a ser tratadas térmicamente. . . . .	19
3.	Materiales de las piezas a ser tratadas térmicamente . . . . .	19
4.	Tabla de ponderación para la selección del diseño propuesto . . . . .	24
5.	Características más importantes de los ladrillos escogidos. . . . .	25
6.	Características más importantes de la manta escogida. . . . .	25
7.	Iteraciones realizadas para determinar el espesor de las paredes del horno. . .	28
8.	Especificaciones de los materiales refractarios . . . . .	34
9.	Gradiente de temperatura simulado con un tiempo total de 5672 segundos. .	61
10.	Gradiente de temperatura simulado con un tiempo total de 3240 segundos. .	63
11.	Vatios disipados. . . . .	65
12.	Parámetros iniciales para el diseño del horno. . . . .	74
13.	Características físicas finales de las paredes. . . . .	75
14.	Costo total del horno en base a sus componentes. . . . .	76

## Lista de Figuras

1.	Fases del proceso de diseño. . . . .	6
2.	Diagrama de fase hierro-carburo de hierro . . . . .	9
3.	Espacio físico de la planta . . . . .	18
4.	Propuesta de un horno eléctrico de piso . . . . .	21
5.	Propuesta de un horno eléctrico de mesa . . . . .	22
6.	Propuesta de un horno de gas . . . . .	23
7.	Circuito resistivo de las paredes del horno . . . . .	26
8.	Pared lateral . . . . .	36
9.	Pared superior . . . . .	36
10.	Pared frontal . . . . .	37
11.	Tipos de disposición de resistencias. . . . .	43
12.	Carga específica máxima recomendada para Kanthal A-1. . . . .	44
13.	Conexión trifásica tipo delta. . . . .	45
14.	Circuito de mando y potencia. . . . .	48
15.	Árbol de decisión para selección del sensor de temperatura. . . . .	49
16.	Controlador de temperatura CN401. . . . .	50
17.	Variador de potencia Watlow. . . . .	51
18.	Esquema representativo del horno. . . . .	52
19.	Circuito equivalente del horno. . . . .	53
20.	Respuesta del sistema frente a una entrada de tipo escalón unitario. . . . .	56
21.	Implementación en Simulink del control PI. . . . .	57
22.	Respuesta frente al escalón unitario del sistema controlado. . . . .	58
23.	Flujo constante aplicado a una pared lateral con un tiempo de simulación de 5672 segundos . . . . .	61
24.	Flujo constante aplicado a una pared lateral con un tiempo de simulación de 3240 segundos. . . . .	62
25.	DCL de la mesa de soporte. . . . .	67
26.	DCL de un pie de la mesa de soporte. . . . .	68
27.	Esfuerzo máximo de la mesa. . . . .	69
28.	Deformación máxima. . . . .	70
29.	Variación longitudinal. . . . .	70
30.	DCL de las bisagras de la puerta. . . . .	71
31.	Esfuerzo máximo de la bisagra de la puerta. . . . .	72

32.	Deformación máxima de la bisagra de la puerta. . . . .	73
33.	Variación longitudinal de la bisagra de la puerta. . . . .	73
34.	Diseño final propuesto basado en todas las consideraciones tratadas en las anteriores secciones. . . . .	77
35.	Horno simulado con 3240 segundos. . . . .	78
36.	Razón de transferencia en un tiempo de enfriamiento de 3240 segundos. . . . .	79

## Resumen

**E**l presente proyecto de titulación aborda el diseño mecánico y de control de un horno para procesos de tratamientos térmicos tomando en cuenta las necesidades de la empresa Fibroacero S.A ubicada en la ciudad de Cuenca, en donde se trabaja con aceros para trabajo en frío, que son parte fundamental para la producción de cocinas y cilindros de gas.

En una primera etapa, se determinaron los parámetros iniciales para el diseño como la temperatura máxima que debe alcanzar y el tamaño interior de la cámara. Después, se desarrolló el sistema mecánico, de control y modelo matemático en donde se obtuvo el tipo de horno, los materiales y medidas de las paredes, dimensionamiento de los elementos resistivos, circuitos de mando y potencia y características del controlador para finalmente evaluar el diseño mediante simulaciones.

Las conclusiones obtenidas fueron que el horno efectivamente logró llegar a una temperatura de  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  con un espesor de pared de  $27.5\text{ cm}$ , una potencia de  $9.15\text{ kW}$  y un tiempo de calentamiento después de aplicar un control tipo PI de 61 minutos.

**Palabras clave:** Horno industrial, Tratamientos térmicos, Transferencia de calor, Sistemas térmicos.

## Abstract

**T**his thesis project approaches the mechanical and control design of a thermal treatment oven considering the requirements of Fibroacero S.A located in Cuenca city, where parts made of cold-work steel are used to produce household ovens and gas tanks.

In a first stage, the initial parameters for the design were determined, such as the maximum temperature it should reach and the interior chamber size. Later, the mechanical system, control system and mathematical model were developed obtaining the oven type, the wall dimensions and materials, the heating elements sizing, the control and power circuits and the control characteristics to finally evaluate the design by means of simulations.

The conclusions obtained were that the oven in fact can reach a temperature of  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  with a wall thickness of 27.5 cm, has a power consumption of 9.15 kW and a heating time after a PI controller was applied of 61 minutes.

**Keywords:** Industrial Oven, Heat treatment, Heat transfer, Thermal systems.

# 1. Introducción

Los hornos de tratamientos térmicos están dentro de los equipos mas utilizados dentro de la industria manufacturera dedicada a los tratamientos térmicos, venta de acero y fabricación de herramientas forjadas además de fundidas, no obstante, muchas de las empresas nacionales, consiguen los equipos sin considerar un diseño que se adecúe a sus necesidades específicas.

Un gran porcentaje de empresas dedicadas adquieren estos equipos de forma directa forzándose a adaptar su infraestructura a modelos y diseños preestablecidos, con geometrías y dimensiones características. Sin embargo, esto trae consigo ineficiencia a empresas que necesitan de condiciones y características específicas de operación para continuar con su plan de trabajo de una forma rápida, eficiente y eficaz, consiguiendo no solo un gasto de energía innecesario, sino un derroche de espacio y recursos los cuales pueden ser invertidos en otra actividad trayendo más beneficios y optimizando los procesos subsecuentes.

En la actualidad existe un numero reducido de empresas que se dedican a la fabricación y venta de repuestos de esta índole, causando no solo una reducción de adaptabilidad en sus modelos sino una disminución de comercialización, de asesoría y venta de equipos para tratamientos térmicos. No obstante, para solventar estas falencias viene dado esta propuesta de diseño, siendo clave para un desarrollo de un sistema funcional fiable, reconociendo así todas las fases que conlleva para que resulte de un diseño exitoso, sin obviar la importancia de los tratamientos térmicos dentro de las empresas dedicadas a la manufactura.

## 2. Problema

### 2.1. Antecedentes

**Fibroacero S.A.** es una empresa cuencana fundada el 26 de enero de 1978 en la República del Ecuador. En el año 1985, Fibroacero S.A. se asocia con la mayor envasadora de gas del país (Duragas) y con otros inversionistas para fabricar cilindros para GLP, llegando a una producción de 2000 cilindros mensuales, e igual número de cocinetas. Para el año 1997 hasta el 2000, Fibroacero S.A. contaba con 423 colaboradores, fabricando un promedio de 20000 unidades mensuales de cocinas y cocinetas ocupando toda su capacidad instalada (3 turnos). A partir del 2010, con la implementación del plan del buen vivir y los cambios en la matriz productiva y energética auspiciados por el gobierno nacional del Ecuador, Fibroacero S.A.

inicia su preparación para la producción de cocinas de inducción.

Como empresa cuenta con más de 42 años de experiencia dedicándose principalmente a la fabricación de equipo de cocina y calefacción de uso doméstico no eléctrico: calentadores de ambiente, cocinetas, parrillas, cocinas, calentadores de agua (calefones), aparatos de cocina y calentadores de platos no eléctricos, que ofrecen mayor funcionalidad, durabilidad y economía familiar.

Como compañía, Fibroacero S.A maneja la filosofía lean manufacturing, como estrategia empresarial, la cual busca mejorar los temas de **efectividad**, **eficiencia** e **innovación** para consiguiente percibir un desarrollo en la cultura empresarial donde los trabajadores son capaces de identificar los problemas y solucionarlos con un liderazgo íntegro, honesto y transparente.

## **2.2. Descripción del problema**

En la actualidad Fibroacero S.A. posee una reconocida marca en línea blanca a nivel nacional, así como en el extranjero, para lo cual, debe cumplir estándares de calidad y producción en sus plantas para satisfacer la demanda de producción garantizando un producto terminado de alta calidad. Para tal labor, como empresa, siempre ha velado por estar en continua innovación y desarrollo de sus tecnologías, así como la constante capacitación de sus empleados. En su búsqueda están obligados a permanecer en la vanguardia de la tecnología, con el fin de mejorar sus procesos y ofrecer la más alta calidad en sus productos. Dentro de sus instalaciones se producen herramientas o utillajes de corte que necesitan ser sometidos a procesos de tratamientos térmicos (temple, revenido, recocido), las cuales deben cumplir con propiedades mecánicas específicas, la empresa al no poseer la tecnología adecuada, con respecto al horno de procesos térmicos, se ve obligada a contratar servicios externos lo que genera múltiples problemas en sus tiempos de producción y por ende en su economía.

## **2.3. Importancia y alcances**

Hace aproximadamente diez años la empresa realizó la compra de un horno para procesos de tratamientos térmicos, pero al no satisfacer las expectativas y generar mucho desperdicio energético, decidieron desmantelar y adquirir uno de menor potencia, dimensiones y características. Al poco tiempo dicho horno dejó de cumplir con los estándares de control y generaba problemas de funcionamiento, desde ese punto la empresa ha buscado un horno que cumpla



con las exigencias pero no ha podido encontrar uno en el mercado. La empresa, al no poseer un horno de tratamientos térmicos de esta índole ha optado por enviar las piezas a otra ciudad a ser tratadas térmicamente, generando como consecuencia pérdidas en el tiempo de espera, dependencia en terceros y un aumento significativo de costos. Por lo expuesto, el diseño de un horno específico para la producción actual y futura de la empresa dará solución a los problemas antes mencionados, así como a posibles inconvenientes provocados cuando las piezas son templadas de manera errónea por terceros.

## **2.4. Delimitación**

### **2.4.1. Espacial o geográfica**

El presente trabajo de titulación fue desarrollado en el país de Ecuador para una empresa ubicada en la provincia del Azuay, cantón Cuenca.

### **2.4.2. Temporal**

El proyecto fue realizado en el año 2022 y se encuentra delimitado por una duración total de 6 meses dentro de los cuales se realizará el diseño del horno de tratamientos térmicos.

### **2.4.3. Sectorial o institucional**

El equipo fue diseñado bajo las necesidades encontradas en la empresa Fibroacero S.A que se dedica a la fabricación de cilindros de gas y equipos de cocina.

## **2.5. Problema General**

- ¿Se podrá diseñar un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.?

## **2.6. Problemas Específicos**

- ¿Se podrá identificar los parámetros iniciales para el diseño de un horno en el área de tratamientos térmicos de la empresa Fibroacero para un proceso de temple?
- ¿Es posible diseñar un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.?

- ¿Es factible evaluar el diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.?

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo General**

- Diseñar el sistema mecánico y de control de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Identificar los parámetros iniciales para el diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.
- Desarrollar el sistema mecánico, de control y el modelo matemático de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.
- Evaluar el diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.

### **4. Hipótesis**

#### **4.1. Hipótesis General**

- Se diseñará de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.

#### **4.2. Hipótesis Específicas**

- Se identificará los parámetros iniciales para el diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.
- Se diseñará un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.
- Se evaluará el diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.

## 5. Matriz de Consistencia Lógica

**Tabla 1**

*Matriz de consistencia lógica.*

Diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa FibroAcero S.A.				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Se podrá diseñar un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa FibroAcero S.A.?	Diseñar el sistema mecánico y de control de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa FibroAcero S.A.	Se diseñará un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa FibroAcero S.A.		Temple, diseño.
<b>ESPECÍFICOS</b>	<b>ESPECÍFICOS</b>	<b>ESPECÍFICAS</b>		
¿Se podrá identificar los parámetros iniciales del diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa FibroAcero S.A.?	Identificar los parámetros iniciales para el diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa FibroAcero S.A.	Se identificará los parámetros iniciales para el diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa FibroAcero S.A.	<b>VI:</b> Diseño	Temperatura, transferencia de calor.
¿Es posible diseñar un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa FibroAcero S.A.?	Desarrollar el sistema mecánico, de control y el modelo matemático de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa FibroAcero S.A.	Se diseñará un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa FibroAcero S.A.	<b>VD:</b> Tratamientos térmicos	Controladores.
¿Es factible evaluar el diseño un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa FibroAcero S.A.?	Evaluar el diseño un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa FibroAcero S.A.	Se evaluará el diseño un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa FibroAcero S.A.		Eficiencia térmica.

**Nota:** *Elaborado por el autor.*

## 6. Marco Teórico

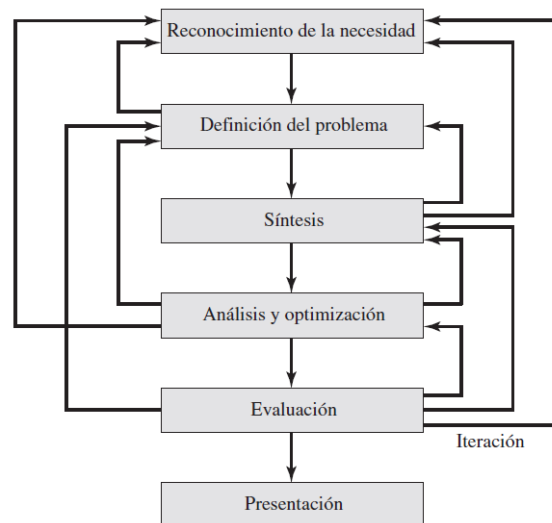
### 6.1. Diseño

El diseño se puede definir como el proceso de concepción, desarrollo y realización de productos, sistemas, artefactos, servicios o procesos que buscan satisfacer una necesidad identificada o percibida que trabaja bajo límites definidos. En muchos casos es necesaria la aplicación de principios, conocimientos, métodos, herramientas y habilidades de diferentes disciplinas dependiendo del diseño que se lleva a cabo. El diseño generalmente nace con una idea y termina con conjunto de dibujos o representaciones computacionales que permiten que un producto sea manufacturado y utilizado (Childs, 2014).

El diseño es un proceso que debe ser planeado y elaborado cuidadosamente. La figura 1 muestra un bosquejo de las fases a seguir en este. Como se observa, se necesita de la repetición de algunas fases del proceso para cada vez acercarse más el diseño a ser una solución óptima para el problema o necesidad planteados.

**Figura 1**

*Fases del proceso de diseño.*



**Nota:** Obtenida de Budynas y Nisbett (2012).

El primer paso es reconocer una necesidad, tarea no tan sencilla pues en algunos casos la necesidad no es del todo evidente. El siguiente paso es la definición del problema y es en donde se incluyen las especificaciones del objeto a diseñar, éstas definen el costo, vida

esperada, confiabilidad, cantidad que se va a manufacturar y la temperatura de operación tomando en cuenta cantidades de salida y entrada, características, dimensiones y limitaciones (Budynas y Nisbett, 2012).

La síntesis es el proceso en el cual se combinan las ideas desarrolladas para crear un concepto que ofrece una potencial solución a los requerimientos de diseño, en el análisis se aplica el conocimiento de ingeniería tales como: estadística, mecánica de materiales, estática, entre otros, de manera que se examina el diseño para obtener información cuantitativa. Posteriormente, en la optimización, se refinan criterios específicos de manera repetitiva para llegar al mejor resultado. Finalmente, en la evaluación se identifica si el diseño satisface los requerimientos iniciales y, si no se cumplen estos, se realizan iteraciones en donde se replantean ideas y análisis hasta llegar a un resultado deseado (Childs, 2014).

Existen una variedad de factores a tomar en cuenta el momento de realizar un diseño, a estos se los conoce como consideraciones de diseño y algunas son (Budynas y Nisbett, 2012):

- Funcionalidad
- Resistencia
- Desgaste
- Seguridad
- Confiabilidad
- Facilidad de manufactura
- Costo
- Vida
- Ruido
- Tamaño
- Forma
- Control
- Propiedades térmicas
- Mantenimiento

Por otro lado, al momento de realizar un diseño es importante tomar en cuenta normas y códigos. Budynas y Nisbett (2012) define el término norma como “un conjunto de especificaciones para partes, materiales o procesos establecidos a fin de lograr uniformidad, eficiencia y cantidad especificadas”, así mismo, a la palabra código la define como “un conjunto de especificaciones para analizar, diseñar, manufacturar y construir algo.”

Al momento de diseñar se tiene que hacer el mayor uso posible de tamaños estándar pues son más fáciles de conseguir y su costo es menor. Si se hace uso de dimensiones especiales o

poco comunes el costo será mayor, pues se tendrá que fabricar bajo pedido y el tiempo de entrega también podría aumentar, también se debe de visitar proveedores locales y conocer su disponibilidad de productos ya que, en muchos casos, ciertos productos encontrados por la web son complicados de importar o conseguir a tiempo (Childs, 2014).

## 6.2. Temple

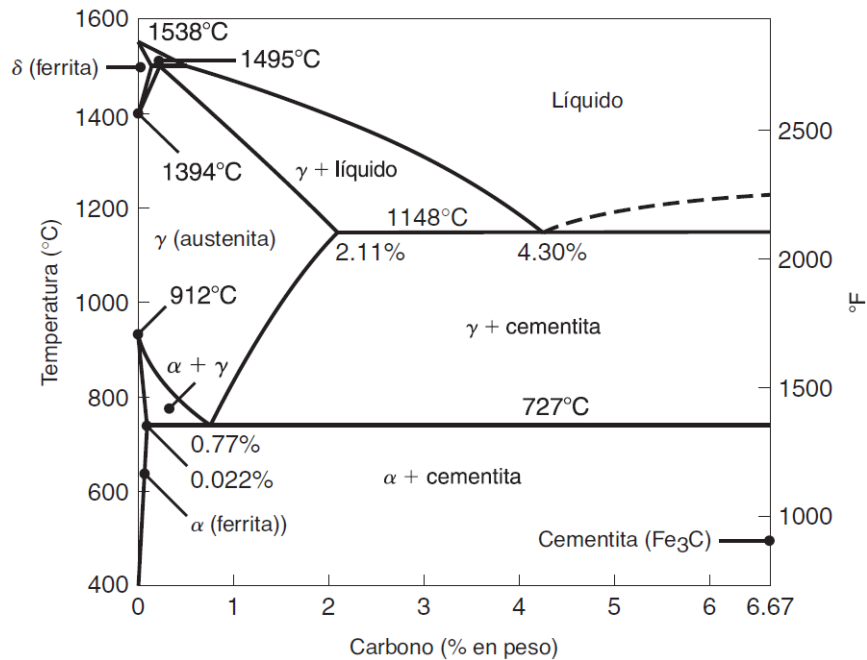
Antes de abordar el tema de tratamientos térmicos y el temple es necesario conocer los principios básicos del sistema hierro-carbono. Primeramente, los aceros y hierros fundidos se encuentran representados en un sistema binario hierro-carbono, dependiendo del porcentaje de carbono se tiene diferentes características. El hierro que contiene hasta 0.008% de carbono es el conocido como comercialmente puro, los aceros son aquellos con hasta 2.11% de carbono y los hierros fundidos contienen hasta 6.67% de carbono, aunque con normalidad se los encuentra con un porcentaje de hasta 4.5%. La temperatura de fundición del hierro puro es de 1538 °C y cuando se enfría primero se forma ferrita delta, luego austenita y al final ferrita alfa (Kalpakjian y Schmid, 2008).

La ferrita alfa, también llamada ferrita, es una solución de solida de hierro cubico centrado en el cuerpo, es relativamente dúctil, suave y es magnética desde la temperatura ambiente hasta 768 °C; por otra parte, la ferrita delta es estable solo a altas temperaturas y no tiene gran importancia practica en la ingeniería, mientras que la austenita se da cuando el hierro sufre una transformación polifórmica y pasa de bcc a fcc en un cierto margen de temperatura resultando en que sea más densa que la ferrita, sea dúctil a altas temperaturas, posea buena formabilidad, se pueda disolver níquel y manganeso para proveerlo de nuevas propiedades y no es magnética (Kalpakjian y Schmid, 2008). La cementita es 100% carburo de hierro y tiene 6.67% de carbono, también se le llama carburo, recordando que el hierro de carburo no es el mismo carburo que se encuentra en herramientas de corte, matrices y abrasivos, además de que las características de la cementita son que es duro, frágil, puede incluir otros elementos en aleaciones como el cromo, molibdeno y manganeso. (Kalpakjian y Schmid, 2008)

La figura 2, muestra el diagrama de fase hierro-carburo del hierro en donde se puede notar las diferentes fases antes explicadas y su relación entre la temperatura y el porcentaje de carbono.

**Figura 2**

*Diagrama de fase hierro-carburo de hierro*



**Nota:** *Obtenido de Kalpakjian y Schmid (2008).*

Los tratamientos térmicos más comunes en el campo de los aceros son el recocido, normalizado, temple y revenido. El recocido es un tratamiento en donde se calienta la pieza a una temperatura específica para mantenerla ahí por un tiempo determinado y luego se la enfría lentamente en el horno, de esta manera, se logra generar una perlita gruesa y se reduce la dureza de una microestructura facilitando el mecanizado (Askeland, Romo Muñoz, Fulay, Wright, y Hernández Lanto, 2017).

Por otro lado, el normalizado genera una perlita fina al hacer que la pieza de trabajo se enfríe de manera más rápida al aire, resultando en resistencia y dureza más elevadas, menor ductilidad que lo obtenido con el recocido, una estructura uniforme, disminución de esfuerzos residuales y maquinabilidad mejorada; de forma similar, el temple es un proceso en cual se calienta la pieza de trabajo y se la enfría rápidamente para endurecerla; en general, la dureza aumenta al aumentar la velocidad de temple (Shackelford, 2008).

Otro concepto importante a tener en cuenta es el de templabilidad, que es la capacidad que tiene un acero para ser endurecido mediante temple, prosiguiendo con el revenido que

es un proceso posterior al temple en donde se controlan las propiedades finales del acero reduciendo su dureza y aumentando la tenacidad, el cual se lo realiza calentando la pieza nuevamente, pero a una temperatura menor que la de temple y dejándola enfriar de manera lenta y controlada (Askeland y cols., 2017; Shackelford, 2008).

Los esfuerzos residuales y agrietamiento al realizar el temple son inducidos por la expansión y contracción térmica, pues al templar un acero la superficie se enfría de manera más brusca que el centro, transformándose en martensita primero la parte exterior y luego la interior, causando que la superficie dura se someta a tensión, dando la posibilidad de formación de grietas por templado. Igualmente, se debe controlar la rapidez de templado la cual depende de factores como la rapidez de enfriamiento de la superficie comparada al centro de la pieza, la temperatura y las características de transferencia de calor del medio de templado, también es posible agitar la pieza dentro del medio para romper la capa de vapor, dando paso a líquido más fresco y que la transferencia térmica tome lugar de mejor manera, siendo los fluidos más utilizados para temple el aceite, agua y salmuera. (Askeland y cols., 2017)

Por otro lado, existen tratamientos superficiales los cuales generan piezas con superficies duras y fuertes, aptas para situaciones de desgaste y fatiga, pero con núcleos blandos, dúctiles y tenaces ideales para situaciones donde se requiera resistencia a impactos, extendiendo los procesos de: carburizado, carbonitrurado, cianurado, nitrurado, borurado, endurecimiento a la flama y endurecimiento por inducción, en donde los más comunes son el carburizado y nitrurado basados en difusión controlada de carbono y nitrógeno (Askeland y cols., 2017; Kalpakjian y Schmid, 2008).

### **6.3. Controladores**

Los sistemas de control se encuentran formados por subsistemas y plantas, unidos de tal manera que puedan controlar las salidas de los procesos (Nise, 2006), en pocas palabras, al recibir una entrada o estímulo, producen una salida o respuesta esperada, igualmente son los responsables de analizar variables y enviar las señales a distintos elementos para mantener la variable controlada en los valores esperados. Los objetivos principales de los sistemas de control son producir una respuesta transitoria deseada, reducir el error en estado estable y llegar a la estabilidad (Nise, 2006).

Los controladores de temperatura son dispositivos encargados de regular la temperatura y



lo pueden hacer con diferentes niveles de precisión al estar compuestos por sensores como termocuplas, RTDs o termistores los cuales se encargan de obtener información la cual es comparada con una referencia, para que así el controlador active una señal de salida en donde un elemento de calentamiento está conectado (McDowell y cols., 2021). Generalmente, los controladores usados para temperatura son: controladores On/Off, controladores proporcionales y controladores PID. (Oven Industries, s.f.)

Los controladores On/Off constan de dos estados, uno de encendido y uno de apagado, haciendo que cuando la temperatura actual del sistema se encuentra por encima de la temperatura deseada, el controlador pasará al estado de apagado o de enfriamiento y cuando la temperatura actual se encuentre por debajo de la deseada, el controlador pasará al estado de encendido o calentamiento, no obstante, este tipo de funcionamiento no es muy preciso y puede resultar en valor muy altos de sobredisparo de temperatura, así como grandes oscilaciones alrededor de la temperatura deseada (McDowell y cols., 2021).

Por otra parte, se tiene los controladores proporcionales los cuales son una versión mejorada de los On/Off y funcionan en base a una banda definida alrededor de la temperatura deseada, teniendo que si la temperatura actual entra dentro de esta banda, el controlador reducirá el porcentaje de energía, haciendo que la temperatura no salga de la banda y así reduciendo la necesidad circular por los estados On/Off continuamente. Finalmente, los controladores PID hacen uso de tres parámetros: el proporcional, el integral y el derivativo, para lo cual toman en cuenta la diferencia de temperatura pasada, la actual y la predicción de la temperatura futura, por consiguiente este tipo de controlador es el más preciso y consistente, además de ser el más comúnmente usado debido a su capacidad de satisfacer los requerimientos de los procesos (Oven Industries, s.f.).

## **6.4. Termodinámica**

Según Cengel (2003) el término termodinámica proviene de las palabras griegas calor y fuerza, por ende, estudia la cantidad de transferencia de calor a cuando un sistema pasa por un estado de equilibrio a otro. Por lo general cuando se trata el tema se utiliza el término de rapidez o razón, entonces, tendrían que aplicarse los conceptos en un sistema que requiere de un equilibrio térmico, y, por lo tanto, se produciría un fenómeno de no equilibrio en el sistema, por consiguiente el estudio de la transferencia de calor no solo puede basarse en las leyes de la termodinámica, pero si ponen un lineamiento para el estudio y análisis.

Kreith, Bohn, y Salas (2001) afirma que “la termodinámica es la rama de la ciencia que trata sobre la relación entre el calor y las otras formas de energía, incluyendo el trabajo mecánico”, todos los procesos de transferencia de calor obedecen a la primera y segunda ley de la termodinámica, pero sin olvidar que la termodinámica está restringida al estudio de los estados de equilibrio, ya sea mecánicos, químicos o térmicos.

El punto clave que trata la termodinámica es la determinación de la tasa de transferencia de calor para una diferencia de temperatura específica, haciendo que este proceso ayude al momento de estimar el costo, o la posibilidad y el tamaño que necesitaría cumplir el equipo para transferir el calor de una forma adecuada y precisa en un tiempo dado (Kreith y cols., 2001).

Cuando se analiza la primera ley de la termodinámica se infiere que se aplica el principio de la conservación de la energía, en efecto Cengel (2011) sostiene que “la primera ley requiere que la razón de la transferencia de energía hacia un sistema sea igual a la razón de incremento de la energía de ese sistema”. Cuando se analiza la segunda ley, se menciona que la energía tiene calidad, cantidad y que los procesos ocurren hacia donde disminuye la calidad de energía, así Cengel (2011) afirma que “en la segunda ley se requiere que el calor se transfiera en la dirección de la temperatura decreciente”.

#### **6.4.1. Sistemas cerrados y abiertos**

Cuando se habla de un sistema, es cualquier cosa que se va a analizar, puede ser tan simple como un cuerpo libre, o tan complejo como una refinería, al estudiar la composición de la materia que se encuentra en el interior puede ser fija, o puede variar mediante reacciones (Moran, 2018).

Al fijarse en cualquier cosa que sea externa al sistema, se lo denomina parte del entorno y cada uno de estos se distingue de cada sistema por un límite llamado frontera, que puede estar en movimiento o en reposo (Moran, 2018).

Cengel (2003) afirma que un sistema se define como “una cantidad de materia o una región en el espacio elegida para análisis”. La superficie real o imaginaria que separa al sistema de sus alrededores se llama frontera y hace referencia a una superficie, ya sea real o imaginaria, que separa al sistema de su entorno pudiendo ser fija o móvil.

Kern (2008) sostiene que “Un sistema cerrado se define como una cantidad determinada de materia”, un sistema cerrado siempre tiene la misma cantidad de materia, consecuentemente implica que no existe una transferencia de masa a través de su frontera.

Un sistema cerrado tiene como característica que posee una masa fija cuantitativa, y dicha masa no puede atravesar la frontera del sistema; por el contrario, la energía cuando se presenta en forma de calor o trabajo puede cruzar la frontera del sistema, mientras que cuando se necesita que la energía no pueda cruzar la frontera, se dice que el sistema es aislado (Cengel, 2003).

#### **6.4.2. Propiedades de un sistema**

Cuando se hace referencia a las características de los sistemas, se habla entonces de las propiedades de los sistemas, estos pueden ser como la presión, la temperatura, la masa, el volumen, la conductividad térmica, el coeficiente de expansión térmica, entre otras. Las propiedades pueden ser extensivas o intensivas, las primeras son la temperatura, la presión y la densidad, en tanto que las últimas son las que cuyos valores dependen del tamaño del sistema analizado (Cengel, 2003).

### **6.5. Transferencia de calor**

La transferencia de energía se produce por regla general, del medio que tiene la temperatura mas alta, al que tiene menor temperatura, esa transferencia se detiene cuando los medios alcanzan la misma temperatura. El calor se manifiesta como resultado de la diferencia de temperatura y es una de las formas en la que la energía se transmite de un medio a otro mientras que la transferencia de calor trata de determinar las razones de dicha transferencia, por lo que un requisito esencial es que exista una diferencia de temperatura, por ende, no puede haber transferencia si los dos medios tienen la misma temperatura (Cengel, 2011).

La diferencia de temperatura es la fuerza que impulsa el proceso, y la velocidad de transferencia de calor depende de la magnitud del gradiente (Cengel, 2011), teniendo en síntesis lo señalado por Incropera y DeWitt (1999) donde: “la transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas”, esto quiere decir que mientras se de una diferencia de temperatura entres dos cuerpos, existe transferencia de calor".

### **6.5.1. Conductividad térmica**

Otro concepto fundamental en el estudio de la transferencia de calor es el de conductividad térmica en donde Incropera y DeWitt (1999) señalan que dicho termino “proporciona una indicación de la velocidad a la que transfiere la energía mediante el proceso de difusión, y depende de la estructura física de la materia (atómica y molecular) que se relaciona con el estado de la materia”.

### **6.5.2. Transferencia de la energía**

Cengel (2011) sostiene que “una interacción energética es transferencia de calor si su fuerza impulsora es una diferencia de temperatura, caso contrario, es trabajo”.

### **6.5.3. Mecanismos de transferencia de calor**

Cuando se habla de calor, este puede transferirse de tres modos: conducción, convección y radiación y en cada uno de estos debe existir una diferencia de temperatura para que ocurra el proceso de transferencia de calor, a continuación se aborda cada uno de ellos. (Cengel, 2011).

#### **1. Conducción**

Cengel (2011) afirma que “La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas”, esto da como finalidad que las partículas interactúen entre sí, además la conducción puede ocurrir en sólidos, líquidos y también en gases, en el caso de los sólidos se da por las vibraciones de las moléculas del material, y en el caso de los líquidos y gases se da por la difusión de las moléculas durante el movimiento (Cengel, 2011).

La rapidez de la conducción del calor se ve afectado por las características geométricas, su espesor, el material de que este hecho y la diferencia de temperatura a la que está sometida (Cengel, 2011), igualmente bajo el criterio de Incropera y DeWitt (1999) “se considera conducción a la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas”.

#### **2. Convección**

La convección es el modo de transferencia de energía que se da entre una superficie solida a un liquido o a un gas que esta en movimiento, entre mas deprisa el fluido este en movimiento, mas deprisa ocurre la transferencia de calor por convección. La convección

es forzada si el fluido es forzado a permanecer en movimiento en la superficie sólida; en su contrariedad, se dice que es natural si el movimiento del fluido es causado por fuerzas inducidas por la diferencia de la densidad o la variación de temperatura (Cengel, 2011).

Cuando sucede una transferencia de calor por convección, se dice que pasa por dos mecanismos, el primero es por movimiento molecular aleatorio (difusión) y el segundo por movimiento global (macroscópico de fluido) (Incropera y DeWitt, 1999).

### 3. Radiación

La principal característica de la radiación es que es emitida en forma de ondas electromagnéticas por consecuencia de las configuraciones de los átomos y moléculas. A diferencia de las anteriores formas de transferencia de calor, ésta no necesita la presencia de un intermediario, lo cual hace que esta sea la más rápida (velocidad luz), y no sufre una atenuación si se realiza en vacío (Cengel, 2011); en breve, cuando se trata de transferencia de energía por radiación, se trata simplemente de la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita (Incropera y DeWitt, 1999).

## 6.6. Aislamiento térmico

Para que un material cumpla con la condición de aislante térmico debe tener una conductividad térmica baja, esto se puede obtener almacenando o llenando de algún tipo de gas como el aire dentro de los equipos (Kreith y cols., 2001). Los materiales aislantes cuentan con tres categorías en los cuales se puede clasificar:

### 1. Fibrosos

Los materiales fibrosos cuentan con partículas de filamentos con una densidad baja y de diámetro pequeño

### 2. Celular

Los materiales celulares cuentan con celdas cerradas o abiertas que suelen tener la forma de tableros flexibles o rígidos.

### 3. Granular

Los materiales granulares por lo general constan de partículas pequeñas de materiales inorgánicos que se aglomeran en formas prefabricadas o utilizadas como polvos.

## 6.7. Método por elementos finitos

El método por elementos finitos (MEF) es un procedimiento numérico para resolver problemas físicos gobernados por una ecuación diferencial o un teorema de energía (Sergerlind, 1984) y según Valero (2004) el método de los elementos finitos de un método de aproximación de problemas continuos sucede de tal forma que:

- “El continuo se divide en un número finito de partes “elementos”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “nodos”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes” (Valero, 2004).
- “La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos” (Valero, 2004).
- “Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos” (Valero, 2004).
- “El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de formas” (Valero, 2004).

El procedimiento MEF se basa principalmente en transformar un cuerpo continuo a un modelo discreto, dicha transformación se designa como “discretización del modelo”, el comportamiento del modelo del cuerpo se obtiene por interpolación de los valores conocidos de los nodos. Por lo tanto, es una aproximación de los valores de la función a partir de un punto finito o un número conocido.

### 6.7.1. Funciones de forma

Cuando se hace referencia al método MEF, la interpolación de valores es clave para el desarrollo del proceso, ya que se basa en las funciones de forma, consiguiendo reducir el problema a la resolución de unos pocos nodos conocidos, tomando en cuenta que las funciones deben dar valores muy aproximados de los corrimientos de cualquier punto del elemento y debe estar en función de los corrimientos de los nodos (Valero, 2004).

### **6.7.2. Sistema discreto**

Es la primera subdivisión principal del método de elementos finitos (MEF), en donde se utilizan elementos discretos (divididos en líneas) para obtener los desplazamientos y deformaciones de los puntos de enlace (nodos) que tiene un miembro o armazón estructural, a su vez utiliza el análisis matricial en las estructuras y produce resultados idénticos al análisis clásico de armazón estructural; además, los nodos tienen sus tres grados de libertad y trabaja con elementos 1D (líneas) (Sergerlind, 1984).

### **6.7.3. Sistema continuo**

Es la segunda subdivisión principal del MEF donde el objeto es discretizado o mallado en elemento finitos y uno tiene infinitos puntos de contacto, de esta manera, este enfoque es el verdadero método de elementos finitos, ya que realiza cálculos aproximados de los parámetros deseados en puntos específicos llamados puntos nodales. Se define con la función vectorial que indica las deformaciones del elemento en función de coordenadas, por tanto trabaja con elementos 2D y 3D (Sergerlind, 1984).

## **7. Marco metodológico**

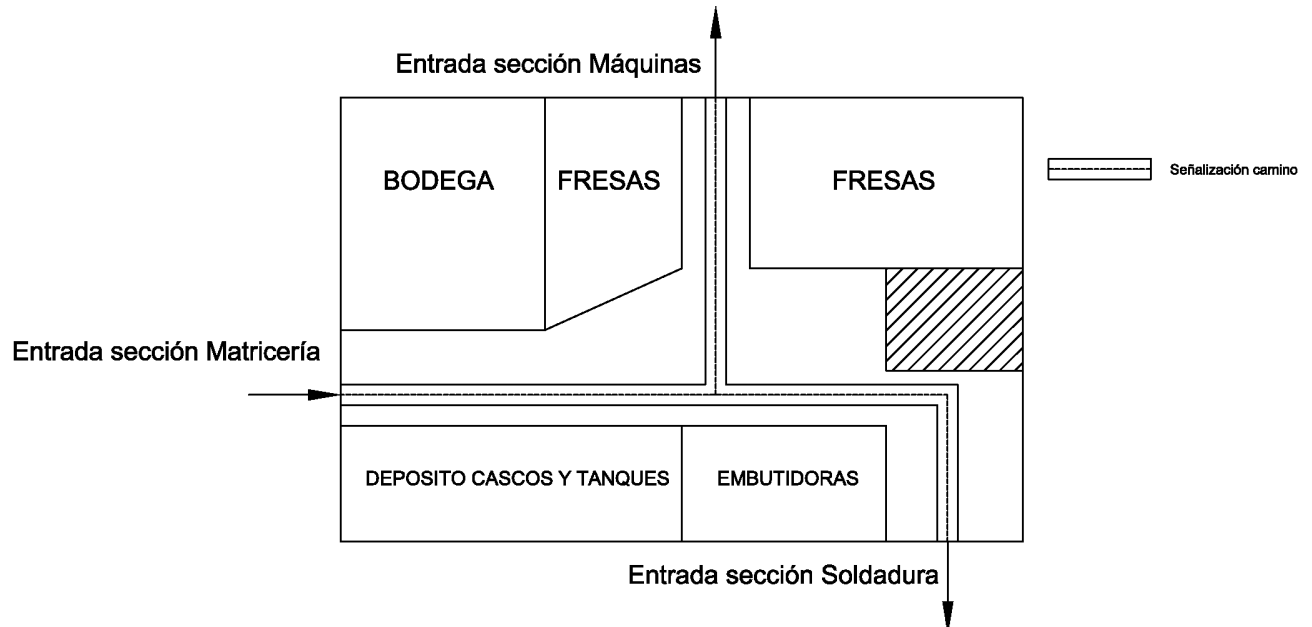
### **7.1. Identificación los parámetros iniciales para el diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.**

#### **7.1.1. Espacio físico**

Dentro de la empresa se puede encontrar la sección de matricería, en la cual existe un espacio destinado para el horno de tratamientos térmicos con dimensiones disponibles de 2100 mm de ancho por 1600 mm de largo, por tanto, se debe tomar en cuenta que el sistema diseñado no supere dichas dimensiones, teniendo en la figura 3, la representación del espacio físico de la planta.

**Figura 3**

*Espacio físico de la planta.*



**Nota:** Realizado por los autores.

### 7.1.2. Dimensiones de las piezas

En la tabla 2, se indica las dimensiones de las piezas que la empresa trabaja en su proceso de producción, estos valores permitieron obtener el máximo de la cámara del horno y así asegurar que sean tratadas todas las piezas necesitadas.



**Tabla 2***Dimensiones de las piezas a ser tratadas térmicamente.*

Nombre de la pieza	Ancho/Diámetro (mm)	Largo (mm)	Profundidad (mm)
Matriz	68	199	40
Punzón	55	194	40
Buje	130	174	—
Columna	75	284	—
Cuchilla cizalla	70	650	22

**Nota:** Elaborado por los autores.**7.1.3. Materiales de las piezas a ser tratadas térmicamente**

Es importante tomar en cuenta los materiales de las piezas que son tratadas térmicamente ya que de esto depende la temperatura a la que debe llegar el horno, siendo en este caso aceros para trabajo en frío y sus especificaciones se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3***Materiales de las piezas a ser tratadas térmicamente*

Material	Temperatura de temple ( $^{\circ}C$ )	Tiempo de temple (min)	Composición química (%)			Medio de enfriamiento
			C	Si	Mn	
K100/XW5	940 a 970	20	2.00	0.25	0.35	Aceite/Baño de sales
K110/XW41	1020 a 1040	20	1.55	0.30	0.30	Aire comprimido/Aceite/Baño de sales
K460/DF-2	780 a 820	20	0.95	0.25	1.10	Baño isotérmico

**Nota:** El tiempo de temple mostrado es aplicable para piezas de 20 mm de espesor, para espesores mayores de aumenta un minuto por cada milímetro. Adaptado de Bohler (2021).

El material que necesita de mayor temperatura de temple es el acero K110 con un valor de 1040 °C por lo que el horno debe alcanzar esta temperatura, sin embargo, se debe superarla para tener un margen de seguridad de manera que se decidió que 1200°C es adecuado.

#### **7.1.4. Medidas antropométricas del operario**

No existe una normativa que regule la altura de hornos, así que se hará uso de la Norma INEN 1641 la cual toma en cuenta las medidas antropométricas y en donde se especifica que las mesas de uso de pie deben tener una altura de  $1050 \pm 20$  mm. Es necesario recalcar que esta medida será a la que se encuentre el piso interior del horno y no de la mesa sobre la cual se posicionará el mismo.

#### **7.1.5. Dimensiones generales del horno**

En base a los parámetros mencionados con anterioridad se establece una medida tentativa de la cámara del horno la cual es: 350x350x700 mm.

### **7.2. Desarrollo del sistema mecánico, de control y el modelo matemático de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.**

#### **7.2.1. Propuestas del diseño mecánico del horno**

En este apartado se presentan tres propuestas de diseño de un horno de tratamientos térmicos que buscan cumplir con los parámetros establecidos en base a las necesidades de la empresa, para esto se ha creado una tabla de ponderación para ajustar las condiciones del horno directamente a los requerimientos del área a la que sera implementado, finalizando con la selección de un modelo como la propuesta mas óptima para este caso.

La figura 4, muestra la propuesta de un horno de medio de calentamiento eléctrico con una estructura que se apoya en el piso y tiene una altura considerable debido a que las piezas largas irán paradas dentro de este. El controlador se encuentra en un extremo del horno con una inclinación que permite la fácil lectura de la pantalla e ingreso de datos y la puerta se abre hacia arriba.

#### **Figura 4**

*Propuesta de un horno eléctrico de piso*

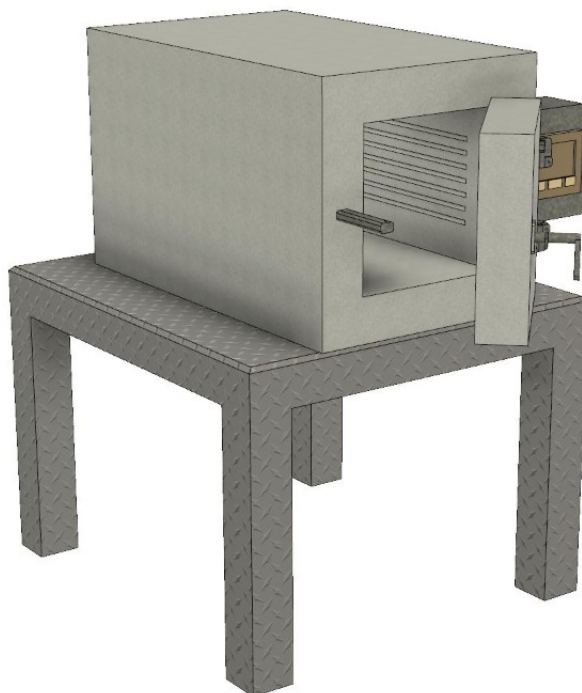


**Nota:** Realizado por los autores.

La figura 5, indica la segunda propuesta la cual es un horno de medio de calentamiento eléctrico con apoyo de la estructura en una mesa de altura que permite un cómodo ingreso de piezas pesadas, el controlador se ubica en la pared derecha del horno con una puerta que se abre hacia el mismo lado y debido a su longitud las piezas largas entrarán acotadas, mientras que otro tipo de piezas de tamaño menor, como es el caso del buje, se posicionarán paradas.

## Figura 5

*Propuesta de un horno eléctrico de mesa*



**Nota:** Realizado por los autores.

En la figura 6, se puede observar la propuesta 3 de un horno de medio de calentamiento por gas con estructura de apoyo en una mesa y con una apertura de puerta hacia arriba. Comparte características de forma y tamaño con el horno eléctrico de mesa, sin embargo, debido a naturaleza de calentamiento tendrá variaciones en sus componentes de entrega y consumo de energía.

## Figura 6

*Propuesta de un horno de gas*



**Nota:** Realizado por los autores.

Una vez obtenidas las propuestas de diseño es necesario determinar cual de ellas cumplirá con los requerimientos de la aplicación de mejor manera, teniendo así en la tabla 4 la ponderación de factores que se han tomado en cuenta para la selección del diseño más apropiado, con calificaciones dadas del 1 al 3 siendo: 1 Malo, 2 Medio y 3 Bueno.

**Tabla 4***Tabla de ponderación para la selección del diseño propuesto*

Factor	Ponderación	Propuesta 1		Propuesta 2		Propuesta 3	
		Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado
Costo de fabricación	0.8	1	0.8	2	1.6	3	2.4
Facilidad de fabricación	0.6	2	1.2	3	1.8	2	1.2
Costo de funcionamiento	0.8	2	1.6	2	1.6	3	2.4
Mantenimiento	0.7	2	1.4	2	1.4	2	1.4
Tamaño	0.2	1	0.2	3	0.6	3	0.6
Ergonomía	0.4	1	0.4	3	1.2	3	1.2
Funcionalidad	0.6	1	0.6	3	1.8	2	1.2
Seguridad	0.7	3	2.1	3	2.1	1	0.7
Sistema de calentamiento	0.6	3	1.8	3	1.8	2	1.2
Control	0.6	3	1.8	3	1.8	1	0.6
<b>TOTAL</b>	<b>6</b>		<b>11.9</b>		<b>15.7</b>		<b>12.9</b>

**Nota:** Elaborado por los autores.

Una vez realizada la ponderación de los posibles diseños de horno se obtuvo como resultado que la opción más adecuada es la propuesta 2, un horno de mesa eléctrico, esto debido a que permite un calentamiento uniforme de las piezas con un fácil ingreso a la cámara y el sistema de calefacción es por medio de resistencias eléctricas.

### 7.2.2. Dimensionamiento del espesor de las paredes del horno

Para poder calcular el espesor de las paredes primero fue necesario conocer los materiales y tipos de elementos refractarios disponibles en el mercado local, necesitando primordialmente de ladrillos refractarios y de fibra cerámica a fin de mantener un correcto aislamiento.

Los ladrillos fueron escogidos principalmente en base a su temperatura de trabajo o servicio que debe ser mínimo de 1200 °C y en base a sus valores de conductividad térmica teniendo como resultado la selección de dos tipos de ladrillos que fueron: Ladrillo K-23 de la compañía Morgan Thermal Ceramics y el ladrillo ER IFB 2300 de Erecos. La tabla 5 muestra las características más importantes, mientras que en el Anexo A se pueden observar las propiedades completas de estos materiales.

**Tabla 5***Características más importantes de los ladrillos escogidos.*

Ladrillo	Temperatura máxima (°C)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica (W/mK)		
<b>K-23</b>	1315	510	0.24(1093°C)	0.20(815°C)	0.16(538°C)
<b>ER IFB 2300</b>	1230	600	0.26(1000°C)	0.23(800°C)	0.20(600°C)

**Nota:** Elaborado por los autores con información compilada de Erecos y Morgan Thermal Ceramics.

Por otro lado, fue necesaria la selección de un tipo de manta cerámica la cual debido a que se encuentra después de las capas de ladrillo, no alcanza los 1200 °C siendo así su temperatura de trabajo mucho menor, por lo que se escogió la manta cerámica LTS de la marca MaxWool y en la tabla 6 se muestran sus principales características.

**Tabla 6***Características más importantes de la manta escogida.*

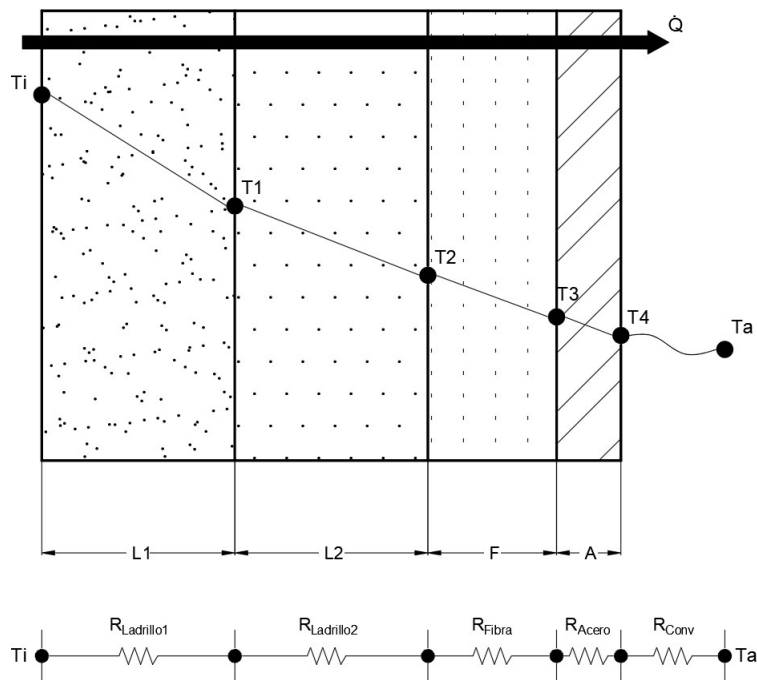
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Temperatura máxima (°C)	Conductividad térmica (W/mK)		
		816°C	538°C	260°C
<b>64</b>	1000	0.33	0.19	0.10

**Nota:** Elaborado por los autores con información provista por NUTEC.

Para el dimensionamiento del espesor de las paredes del horno se plantea el calculo por medio de resistencias térmicas teniendo ladrillos, manta de fibra cerámica y una plancha de acero que se muestran en la figura 7.

**Figura 7**

*Circuito resistivo de las paredes del horno*



**Nota:** Elaborado por los autores.

Para la figura antes mostrada se tiene que:

$\dot{Q}$ = Razón de transferencia de calor	[W]
$L1$ = Longitud del ladrillo 1	[m]
$L2$ = Longitud del ladrillo 2	[m]
$F$ = Longitud de la manta de fibra cerámica	[m]
$A$ = Longitud de la plancha de acero	[m]
$T_i$ = Temperatura de la cara interior del horno	[°C]
$T_1$ = Temperatura entre $L1$ y $L2$	[°C]
$T_2$ = Temperatura entre $L2$ y $F$	[°C]
$T_3$ = Temperatura entre $F$ y $A$	[°C]
$T_4$ = Temperatura en la cara exterior del horno	[°C]



$T_a$  = Temperatura ambiente [°C]

La razón de transferencia de calor total se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{Q} = \frac{T_i - T_a}{R_{Total}} \quad (1)$$

En donde  $R_{Total}$  es la sumatoria de las resistencias del sistema [°C/W], por lo que:

$$R_{Total} = R_{Ladrillo1} + R_{Ladrillo2} + R_{Fibra} + R_{Acero} + R_{Conv} \quad (2)$$

Tomado en cuenta que la resistencia de los ladrillos, fibra y acero es por conducción:

$$R_{Cond} = \frac{L}{kA} \quad (3)$$

En donde:

$L$  = Longitud de la pared [m]

$k$  = Conductividad térmica del material [W/m]

$A$  = Área de la pared [m<sup>2</sup>]

Cengel (2003) expresa que la razón de conducción de calor a través de la paredes es igual a la razón de convección de calor desde la pared hacia el ambiente, por consiguiente, se procedió a calcular un  $\dot{Q}$  de convección desde  $T_4$  hasta  $T_a$ . La temperatura de la cara exterior del horno se impuso en base a la norma ISO 13732-1 y 13732-2 con un valor 40°C y la temperatura ambiente  $T_a$  es de 16 °C debido a que esta es la promedio en la ciudad de Cuenca (Guillen y Orellana, 2017), obteniendo que:

$$\dot{Q} = h_c(T_s - T_a) \quad (4)$$

En donde:

$h_c$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección del aire [W/m<sup>2</sup>°C]

$T_s$  = Temperatura de la superficie  $T_4$  [°C]

$T_a$  = Temperatura del ambiente [°C]

$$\dot{Q} = 10 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} (40^\circ C - 16^\circ C)$$

$$\dot{Q} = 240 W$$

Para el dimensionamiento del espesor de las paredes se procedió de igual forma que en (1), (2) y (3), pero sin tomar en cuenta la resistencia por convección debido a que ya se sabe el valor de  $\dot{Q}$  a través de las paredes y al no conocer el valor de la longitud de cada pared de ladrillo, fibra y acero, se optó por imponer valores del ladrillo y el acero en base a los disponible en el mercado y despejar de las ecuaciones la longitud de la fibra teniendo así que:

$$L_{fibra} = \left( \frac{T_i - T_a}{\dot{Q}} - (R_{Ladrillo1} + R_{Ladrillo2} + R_{Acero}) \right) \cdot kA \quad (5)$$

Se realizaron varias iteraciones con diferentes disposiciones de ladrillos tomando en cuenta su tamaño de venta de 34.3cm x 11.4cm x 7.6cm, efectuando primero los cálculos con una sola pared de ladrillos, no obstante, la longitud necesaria de manta de fibra cerámica era muy alta lo cual incrementaba los costos en gran manera. Posteriormente se decidió que dos paredes de ladrillos acostadas sobre su cara de 7.6 cm con una capa de manta cerámica de 10.2 cm era la opción más adecuada, mostrando en la tabla 7 las iteraciones realizadas para determinar el espesor de las paredes.

**Tabla 7**

*Iteraciones realizadas para determinar el espesor de las paredes del horno.*

<b>Paredes de ladrillo</b>	<b>Longitud de ladrillo (m)</b>	<b>Longitud de fibra (m)</b>	<b>Longitud total de pared (m)</b>
<b>1</b>	0.076	0.164	0.243
	0.114	0.135	0.252
<b>2</b>	0.076	0.102	0.256
	0.114	0.061	0.271

**Nota:** Elaborado por los autores.

### 7.2.3. Cálculo de pérdidas de calor

#### 7.2.3.1. Pérdidas por convección

Las pérdidas de calor por convección se hallaron en todas las paredes exteriores del horno haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = h_c \cdot A(\Delta T) \quad (6)$$

Donde:

$$h_c = \text{Coeficiente de convección de las paredes} \quad [W/m^2K]$$

$$A = \text{Área de las paredes} \quad [m^2]$$

$$\Delta T = \text{Variación de temperatura entre el ambiente y la pared} \quad [K]$$

El coeficiente de convección de las paredes depende de las medidas específicas de cada pared y de su disposición, en consecuencia, fue necesario calcularlo hallando  $N_u$  (Número de Nusselt) que a su vez depende de  $Gr$  (Número de Grashof) y de  $Pr$  (Número de Prandtl) de la siguiente manera:

$$h_c = \frac{N_u \cdot k}{L} \quad (7)$$

$$L = \frac{A}{4 \cdot \sqrt{A}} \quad (8)$$

Si  $Gr \cdot Pr < 10^9$

$$N_u = 0.68 + \frac{0.670(Gr \cdot Pr)^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{4/9}} \quad (9)$$

$$Gr = (\Delta T \cdot \beta) \cdot \frac{L^3 \cdot \rho^2 \cdot g}{v^2} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{1}{T_a} \quad (11)$$

En donde:

$h_c$ = Coeficiente de convección	$[W/m^2K]$
$k$ = Coeficiente de conductividad del aire a 28C	$[W/mK]$
$L$ = Longitud característica	$[m]$
$\beta$ = Coeficiente volumétrico de expansión térmica	$[K^{-1}]$
$\rho$ = Densidad del aire a 28 °C	$[kg/m^3]$
$g$ = gravedad	$[m/s^2]$
$\nu$ = viscosidad cinemática	$[m^2/s]$

Los valores de Pr,  $\rho$ ,  $\nu$  y  $k$  fueron obtenidos mediante el uso de la herramienta Engineering Equation Solver (EES), por otro lado, las pérdidas por convección se calcularon tomando en cuenta dos diferentes áreas: una de las paredes largas del horno y otra de las paredes cortas o tapas de los extremos, obteniendo lo siguiente:

$$\beta = \frac{1}{16^\circ C + 273.15}$$

**Para las paredes largas:**

$$A = (2 \cdot 0.2568m + 0.35m) \cdot (0.7m + 2 \cdot 0.2568m) = 1.0481 m^2$$

$$L = \frac{1.0481m^2}{4 \cdot \sqrt{1.0481m^2}} = 0.2559 m$$

$$Gr = (301.15K \cdot 0.0035K^{-1}) \cdot \frac{(0.2559m)^3 \cdot \left(1.168 \frac{kg}{m^3}\right)^2 \cdot 9.8 \frac{m}{s^2}}{\left(16.1e^{-6} \frac{m^2}{s}\right)^2} = 9.0058e^8$$

$$Nu = 0.68 + \frac{0.670(9.0058e^8 \cdot 0.708)^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{(0.708)}\right)^{9/16}\right)^{4/9}} = 82.37$$

$$h_c = \frac{82.37 \cdot 0.0265 \frac{W}{mK}}{0.2559m} = 8.5287 \frac{W}{m^2K}$$

$$\dot{Q} = 8.5287 \frac{W}{m^2 K} \cdot 1.0481 m^2 (301.15 K) = 250.282 W$$

**Para las paredes cortas:**

Se procede de igual manera que en el cálculo anterior para las paredes largas pero con un área igual a:

$$A_2 = (2 \cdot 0.2568 m + 0.35 m) \cdot (0.35 m + 2 \cdot 0.2568 m) = 0.7458 m^2$$

⋮

$$\dot{Q} = 8.9093 \frac{W}{m^2 K} \cdot 0.7458 m^2 (301.15 K) = 186.0479 W$$

**Pérdidas totales:**

Al tener cuatro paredes largas se tiene que multiplicar las pérdidas encontradas por este valor, de manera similar con las dos paredes cortas, para luego sumar estos valores y obtener las pérdidas totales por convección.

$$\dot{Q}_{Conv} = (4 \cdot 250.282 W) + (2 \cdot 186.0479 W)$$

$$\dot{Q}_{Conv} = 1373.2 W$$

**7.2.3.2. Pérdidas por radiación**

Las pérdidas por radiación se obtienen de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{Rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s (T_s^4 - T_a^4) \tag{12}$$

En donde:

$\varepsilon =$  Emisividad del material de la superficie

$\sigma =$  Constante de Stefan Boltzmann [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]

$A_s =$  Área total de la superficie [m<sup>2</sup>]

$T_s =$  Temperatura de la superficie [°C]

$T_a =$  Temperatura del ambiente [°C]

$$\dot{Q}_{Rad} = 0.3 \cdot 5.67e^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \cdot 5.6839 m^2 \left( (40^\circ C)^4 - (16^\circ C)^4 \right)$$

$$\dot{Q}_{Rad} = 0.2412 W$$

### 7.2.3.3. Pérdidas por aberturas

Existen aberturas en el horno para aliviar la presión interna la cuales producen pérdidas que deben ser tomadas en cuenta y a fin de ser calculadas se procede de igual manera que en (12) considerando que se tiene un orificio de 0.015 m de diámetro y que la temperatura  $T_s$  es la del interior del horno.

$$\dot{Q}_{Aber} = 5.67e^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \cdot 1.7671e^{-4} m^2 \left( (1200^\circ C)^4 - (16^\circ C)^4 \right)$$

$$\dot{Q}_{Aber} = 20.77 W$$

### 7.2.3.4. Pérdidas por calor aportado a la carga

El calor aportado a la carga se calculó tomando en cuenta la pieza más grande que puede ser tratada térmicamente, debido a que esta es la que absorbe la mayor cantidad de calor, teniendo en nuestro caso la cuchilla de la cizalla y las medidas se pueden encontrar en la tabla 2. Por lo tanto se obtiene:

$$\dot{Q}_{Carga} = \frac{m \cdot C_p \cdot \Delta T}{t} \quad (13)$$

En donde:

$$m = \text{Masa de la pieza} \quad [kg]$$

$$C_p = \text{Calor específico de la pieza} \quad [J/kg^\circ C]$$

$$\Delta T = \text{Variación de temperatura} \quad [^\circ C]$$

$$t = \text{tiempo} \quad [s]$$

Los valores de la masa y el calor específico de la pieza fueron obtenidos haciendo uso de la información provista por el manual de aceros especiales del acero K110 de Bohler (2021). Así

mismo, bajo los parámetros estipulados en dicho catálogo y bajo las medidas de la pieza, se estima que se tendrá a la pieza por una hora dentro del horno, obteniendo lo siguiente:

$$\dot{Q}_{Carga} = \frac{7.677kg \cdot 470 \frac{J}{kg^{\circ}C} \cdot (1200^{\circ}C - 16^{\circ}C)}{3600s}$$

$$\dot{Q}_{Carga} = 1186.8 W$$

### 7.2.3.5. Pérdidas por conducción

Las pérdidas por calor almacenado en las paredes vienen dado por la ecuación (14).

$$Q = m \cdot Cp \cdot \Delta T \tag{14}$$

Donde:

$$Q = \text{Cantidad de calor} \quad [kJ]$$

$$m = \text{masa} \quad [kg]$$

$$Cp = \text{calor especifico} \quad [kJ/kg \cdot ^{\circ}C]$$

$$\Delta T = \text{Diferencial de temperatura} \quad [^{\circ}C]$$

Los valores relevantes para el cálculo se muestran en la tabla 8.

**Tabla 8***Especificaciones de los materiales refractarios*

<b>Material Aislante</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor específico (kJ/kg°C)</b>
<b>Ladrillo 1</b>	510	1.1
<b>Ladrillo 2</b>	600	1.129
<b>Manta</b>	64	1.1
<b>Acero Inoxidable</b>	8030	0.5

**Nota:** Elaborado por los autores con información compilada de Erecos y Morgan Thermal Ceramics.

### **Cálculo del diferencial de tiempo**

El calculo partió del concepto de resistencias térmicas de la sección 7.2.2 basado en la figura 7, donde se calculó en estado estable todas las temperaturas superficiales de cada capa del horno, dando como resultado los valores a continuación:

$$T_i = 1200 \text{ } ^\circ C$$

$$T_1 = 889.57 \text{ } ^\circ C$$

$$T_2 = 565.64 \text{ } ^\circ C$$

$$T_3 = 41.96 \text{ } ^\circ C$$

$$T_4 = 40 \text{ } ^\circ C$$

$$T_a = 16 \text{ } ^\circ C$$

Para calcular el diferencial de tiempo, es de interés la temperatura en el interior de cada capa de pared aislante, para esto se calculó el promedio de temperaturas de cada superficie y restando de la temperatura ambiente ( $T_a$ ) se obtiene:

$$T_{p1} = \frac{T_3 - T_4}{2} \quad [^\circ C]$$

$$T_{p2} = \frac{T_2 - T_3}{2} \quad [^\circ C]$$



$$Tp3 = \frac{T1 - T2}{2} \quad [^{\circ}C]$$

$$Tp4 = \frac{Ti - T1}{2} \quad [^{\circ}C]$$

Da como resultado.

$$Tp1 = 40.98 \text{ } ^{\circ}C$$

$$Tp2 = 303.8 \text{ } ^{\circ}C$$

$$Tp3 = 727.605 \text{ } ^{\circ}C$$

$$Tp4 = 1044.79 \text{ } ^{\circ}C$$

Entonces:

$$\Delta T1 = 40.98^{\circ}C - 15^{\circ}C = 25.48 \text{ } ^{\circ}C$$

$$\Delta T2 = 303.8^{\circ}C - 15^{\circ}C = 288.8 \text{ } ^{\circ}C$$

$$\Delta T3 = 727.6055^{\circ}C - 15^{\circ}C = 712.605 \text{ } ^{\circ}C$$

$$\Delta T4 = 1044.79^{\circ}C - 15^{\circ}C = 1029.79 \text{ } ^{\circ}C$$

### **Cálculo de la masa**

Se parte de la ecuación 15

$$m = v \cdot d \quad (15)$$

Donde:

$$m = \textit{masa} \quad [kg]$$

$$v = \textit{volumen} \quad [m^3]$$

$$d = \textit{densidad} \quad [kJ/m^3]$$

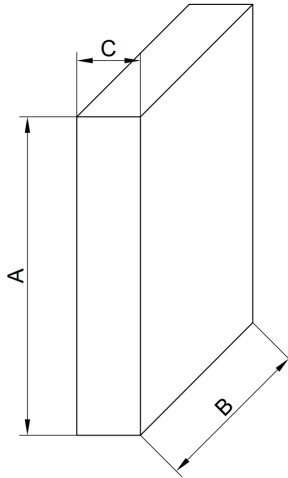
Como el horno está formado por varias capas de diferentes materiales, se analizó los cálculos de la misma forma, aislando las capas para sacar los volúmenes por separado.

### Calculo del volumen

Para facilitar el cálculo se separan por paredes, una lateral, una frontal y una superior, resultando en un volumen total que es la suma de dos paredes laterales, dos paredes superiores y dos paredes frontales, los esquemas de las paredes se presentan en las figuras 8, 9 y 10

#### Figura 8

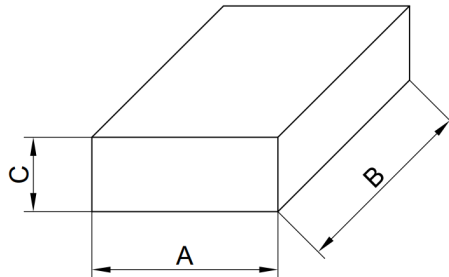
*Esquema de la pared lateral del horno*



**Nota:** Elaborado por los autores.

#### Figura 9

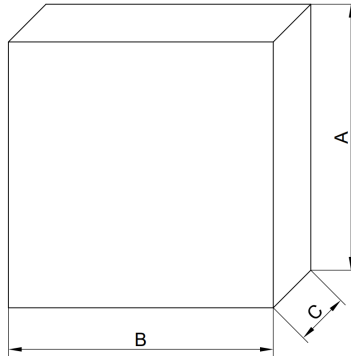
*Esquema de la pared superior del horno*



**Nota:** Elaborado por los autores.

## Figura 10

*Esquema de la pared frontal del horno*



**Nota:** Elaborado por los autores.

La ecuación general del volumen se obtiene multiplicando sus tres dimensiones de la siguiente manera:

$$V = A \cdot B \cdot C \quad (16)$$

Donde:

$$V = \text{volumen} \quad [m^3]$$

$$A = \text{Altura de la pared} \quad [m]$$

$$B = \text{Largo de la pared} \quad [m]$$

$$C = \text{Espesor de la pared} \quad [m]$$

### Calculo de la primera capa de material (Bloque 1)

Pared lateral.

$$V_{Pared1} = (0.076m + 0.35m + 0.076m) \cdot (0.076m + 0.7m + 0.076m) \cdot (0.076m)$$

$$V_{Pared1} = 0.032506 \text{ m}^3$$

Pared frontal.

$$V_{Pared2} = (0.076m + 0.35m + 0.076m) \cdot (0.35m) \cdot (0.076m)$$

$$V_{Pared2} = 0.013353 \text{ m}^3$$

Pared superior.

$$V_{Pared3} = (0.35m) \cdot (0.7m) \cdot (0.076m)$$

$$V_{Pared3} = 0.01862 \text{ m}^3$$

Entonces el volumen total de la primera capa de ladrillo refractario es:

$$V_{Total} = 0.1290 \text{ m}^3$$

### **Calculo de la segunda capa de material (Bloque 2)**

Pared lateral.

$$V_{Pared1} = (0.152m + 0.35m + 0.152m) \cdot (0.7m + 0.152m + 0.152m) \cdot (0.076m)$$

$$V_{Pared1} = 0.0499 \text{ m}^3$$

Pared frontal.

$$V_{Pared2} = (0.152m + 0.35m + 0.152m) \cdot (0.35m) \cdot (0.076m)$$

$$V_{Pared2} = 0.01739 \text{ m}^3$$

Pared superior.

$$V_{Pared3} = (0.35m) \cdot (0.7m) \cdot (0.076m)$$

$$V_{Pared3} = 0.01862 \text{ m}^3$$

Entonces el volumen total de la segunda capa de ladrillo refractario es:

$$V_{Total} = 0.17182 \text{ m}^3$$

### **Calculo de la tercera capa de material (Manta refractaria)**

Pared lateral.

$$V_{Pared1} = (0.2535m + 0.35m + 0.2535m) \cdot (0.2535m + 0.7m + 0.2535m) \cdot (0.1015m)$$

$$V_{Pared1} = 0.10499 \text{ m}^3$$

Pared frontal.

$$V_{Pared2} = (0.2535\text{m} + 0.35\text{m} + 0.2535\text{m}) \cdot (0.35\text{m}) \cdot (0.1015\text{m})$$

$$V_{Pared2} = 0.030445 \text{ m}^3$$

Pared superior.

$$V_{Pared3} = (0.35\text{m}) \cdot (0.7\text{m}) \cdot (0.1015\text{m})$$

$$V_{Pared3} = 0.024865 \text{ m}^3$$

Entonces el volumen total de la tercera capa (manta refractaria) es:

$$V_{Total} = 0.240161 \text{ m}^3$$

### **Calculo de la cuarta capa de material (Acero Inoxidable)**

Pared lateral.

$$V_{Pared1} = (0.2565\text{m} + 0.35\text{m} + 0.2565\text{m}) \cdot (0.2565\text{m} + 0.7\text{m} + 0.2565\text{m}) \cdot (0.003)$$

$$V_{Pared1} = 0.00314 \text{ m}^3$$

Pared frontal.

$$V_{Pared2} = (0.2565\text{m} + 0.35\text{m} + 0.2565\text{m}) \cdot (0.35\text{m}) \cdot (0.003\text{m})$$

$$V_{Pared2} = 0.000906 \text{ m}^3$$

Pared superior.

$$V_{Pared3} = (0.35\text{m}) \cdot (0.7\text{m}) \cdot (0.003\text{m})$$

$$V_{Pared3} = 0.000735 \text{ m}^3$$

Entonces el volumen total de la cuarta capa (acero inoxidable) es:

$$V_{Total} = 0.009562 \text{ m}^3$$

**Obtención de la masa de los elementos que componen las paredes:**

Masa del ladrillo refractario 1

$$m_{Ladrillo1} = 68.34 \text{ kg}$$

Masa del ladrillo refractario 2

$$m_{Ladrillo2} = 103.092 \text{ kg}$$

Masa de la manta

$$m_{Manta} = 18.57 \text{ kg}$$

Masa del acero inoxidable

$$m_{Acero} = 76.7829 \text{ kg}$$

**La cantidad de calor se encuentra reemplazando los valores anteriores y se obtiene**

Cantidad de calor del ladrillo refractario 1

$$Q_{L1} = 68.3477 \text{ kg} \cdot 1.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ \text{C}} \cdot 1029.79^\circ \text{C}$$

$$Q_{L1} = 77422.2 \text{ kJ}$$

Cantidad de calor del ladrillo refractario 2

$$Q_{L2} = 103.092 \text{ kg} \cdot 1.129 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ \text{C}} \cdot 712.605^\circ \text{C}$$

$$Q_{L2} = 82940.7 \text{ kJ}$$

Cantidad de calor de la manta refractaria

$$Q_m = 18.57 \text{ kg} \cdot 1.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ \text{C}} \cdot 288.8^\circ \text{C}$$

$$Q_m = 8849.14 \text{ kJ}$$

Cantidad de calor del acero inoxidable

$$Q_{ac} = 76.7829 \text{ kg} \cdot 0.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ \text{C}} \cdot 25.48^\circ \text{C}$$

$$Q_{ac} = 997.41 \text{ kJ}$$

Entonces:

$$Q_{Total} = 164350 \text{ kJ}$$

### Calculo del ciclo de trabajo

$$Ciclo = 3600 \cdot 24h = 86400 \text{ s}$$

Donde dividiendo para un ciclo de funcionamiento se obtiene:

$$W_{total} = \frac{Q_{total}}{86400s}$$

$$W_{total} = 1.902 \text{ kW}$$

#### 7.2.4. Cálculo de la potencia del horno

La potencia del horno se calcula en base a las pérdidas de calor y la potencia suministrada por las niquelinas, debido a que estas últimas deben hacer frente a las perdidas, se ha dispuesto un factor de seguridad de 2 para que el horno llegue a la temperatura necesaria de forma rápida y segura. Se procedió primero hallando la suma de todas las pérdidas de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{Pérdidas_{Tot}} = \dot{Q}_{Conv} + \dot{Q}_{Rad} + \dot{Q}_{Carga} + \dot{Q}_{Cond} + \dot{Q}_{Aber} \quad (17)$$

$$\dot{Q}_{Pérdidas_{Tot}} = 4579.9 \text{ W}$$

Aplicando un factor de seguridad de 2 se obtuvo que la potencia de las niquelinas, es decir, la del horno, fue la siguiente:

$$P_{Horno} = \dot{Q}_{Pérdidas_{Tot}} \cdot 2$$

$$P_{Horno} = 4579.9kW \cdot 2$$

$$P_{Horno} = 9.15 \text{ kW}$$

### 7.2.5. Tiempo de calentamiento

El tiempo de calentamiento del horno fue calculado bajo la siguiente ecuación:

$$t = \int_{T_i}^{T_f} \frac{m \cdot Cp \cdot dT_c}{q_T} \quad (18)$$

En donde:

$$t = \text{tiempo de calentamiento} \quad [s]$$

$$T_i = \text{Temperatura inicial} \quad [^{\circ}C]$$

$$T_f = \text{Temperatura final} \quad [^{\circ}C]$$

$$m = \text{Masa del aire dentro del horno} \quad [kg]$$

$$Cp = \text{Calor específico del aire} \quad [J/kg^{\circ}C]$$

$$q_T = \text{Pérdidas de calor más potencia de las niquelinas} \quad [W]$$

$$t = \int_{16}^{1200} \frac{0.1072 \cdot 1010 \cdot dT_c}{13740}$$

$$t = 5672.7 \text{ s}$$

$$t = 94.54 \text{ min}$$

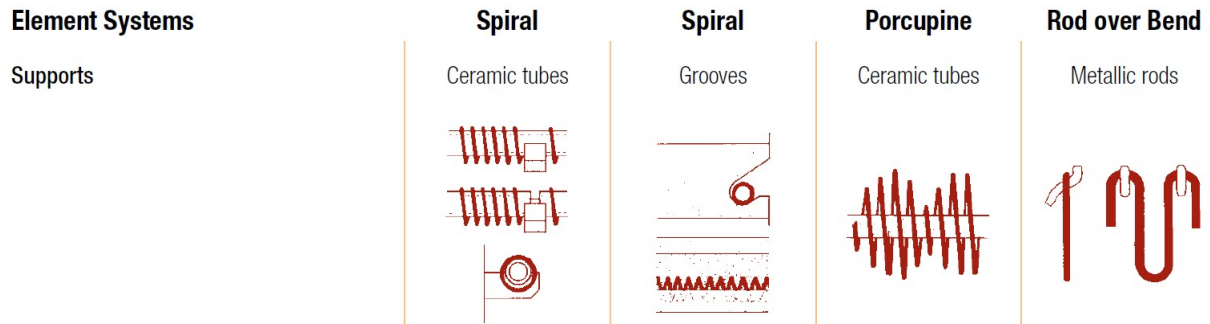
### 7.2.6. Elementos resistivos

Para el cálculo de los elementos resistivos primero fue necesario determinar la disposición que pueden tener estos dentro el horno, existiendo cuatro tipos principales de disposiciones que pueden ser observadas en la figura 11. La escogida fue de tipo arrollada en espiral sobre ranuras debido a su facilidad de mantenimiento, protección contra golpes o choques al momento de cargar las piezas dentro del horno y bajo costo de implementación comparado a las otras disposiciones.



## Figura 11

*Tipos de disposición de resistencias.*

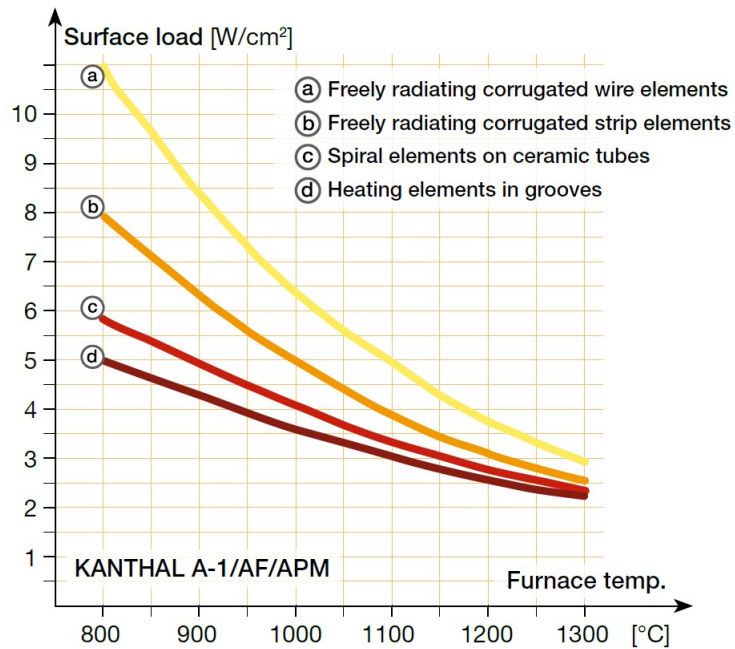


**Nota:** Adaptado de Kanthal (2018).

Debido a que la disposición de espirales en ranuras no permite que la resistencia radie libremente y que se necesita que el horno llegue a una temperatura de 1200 °C, el elemento se debe calcular para una carga resistiva menor, (Astigarraga Urquiza, 1994), por lo que se decidió usar el material Kanthal A-1, disponiendo de sus características en el Anexo B y de la carga específica máxima recomendada en la figura 12.

## Figura 12

*Carga específica máxima recomendada para Kanthal A-1.*

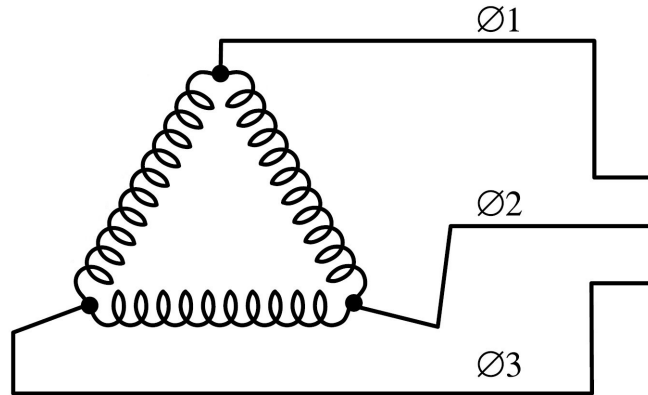


**Nota:** Adaptado de Kanthal (2018).

Posteriormente, se procedió a determinar el tipo de conexión a ser usada. Giberson (2008) indica que para hornos industriales de tratamientos térmicos se debe conectar los elementos en disposición delta, ya que realizando la conexión de esta manera en vez de hacerlo de forma monofásica, se puede usar elementos de alimentación y control de menores dimensiones abaratando así los costos. La figura 13 muestra la disposición que se plantea en el diseño propuesto.

### Figura 13

*Conexión trifásica tipo delta.*



**Nota:** Adaptado de Giberson (2008).

Una vez establecida la conexión que fue utilizada, se procedió a calcular la potencia de cada línea para así poder definir la longitud de los elementos resistivos y demás características de la siguiente manera.

$$P_T = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos(\theta) \quad (19)$$

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

$$P_f = V_f \cdot I_f \cdot \cos(\theta) \quad (21)$$

$$A_c = \frac{P}{p} \quad (22)$$

$$L = \frac{A_c}{10 \cdot \pi \cdot d} \quad (23)$$

$$N = \frac{L \cdot 1000}{\pi(D + d)} \quad (24)$$

$$L_e = \frac{N \cdot s}{1000} \quad (25)$$

En donde:

$P_T$ = Potencia total del horno	[W]
$V_L$ = Voltaje de línea	[V]
$I_L$ = Intensidad de línea	[A]
$\cos(\theta)$ = Factor de potencia	
$I_f$ = Intensidad de fase	[A]
$P_f$ = Potencia de fase	[W]
$V_f$ = Voltaje de fase	[V]
$A_c$ = Área superficial de los elementos resistivos	[cm <sup>2</sup> ]
$p$ = Carga específica del material de las resistencias	[W/cm <sup>2</sup> ]
$L$ = Longitud de las resistencias	[m]
$N$ = Número de espiras	
$d$ = Diámetro del alambre	[mm]
$D$ = Diámetro de la espira	[mm]
$s$ = Paso de la espira	[mm]
$L_e$ = Longitud de la espira	[m]

Debido a que la carga es puramente resistiva y está dispuesta de tal manera que en cada fase haya la misma longitud de resistencia, se trata de una carga equilibrada y el factor de potencia es igual a 1; por otra parte, la potencia para el cálculo del área superficial, se usará la potencia de fase debido a que se calculó la longitud de las resistencias por fase. Por otro lado, la carga específica fue obtenida en base a la figura 12 tomando como punto de referencia la temperatura de 1200 °C y finalmente el diámetro del alambre fue escogido de 4mm, el diámetro de la espira de 6 veces  $d$  y el paso de la espira de 3 veces  $d$ , en base a las recomendaciones de Kanthal (2018), tomando en cuenta que si los diámetros antes mencionados fuesen de dimensiones muy pequeñas, los elementos resistivos tendrán una corta vida útil y tenderán a

destemplarse con el tiempo. Los cálculos realizados fueron los siguientes:

$$I_L = \frac{9150W}{\sqrt{3}(220V)} = 24.01 A$$

$$I_f = \frac{24.01A}{\sqrt{3}} = 13.86 A$$

$$P_f = 220V \cdot 13.86A \cdot 1 = 3049.2 W$$

$$A_c = \frac{3049.2W}{2.2 \frac{W}{cm^2}} = 1386 cm^2$$

$$L = \frac{1386cm^2}{\pi \cdot \frac{4mm}{10}} = 11.02 m$$

La longitud de las resistencias por fase es de 11.02m, al tener 3 fases se tiene un total de 33.06m, de tal manera que:

$$N = \frac{33.06m \cdot 10}{\pi(24mm + 4mm)} = 376.25 \approx 376 \text{ espiras}$$

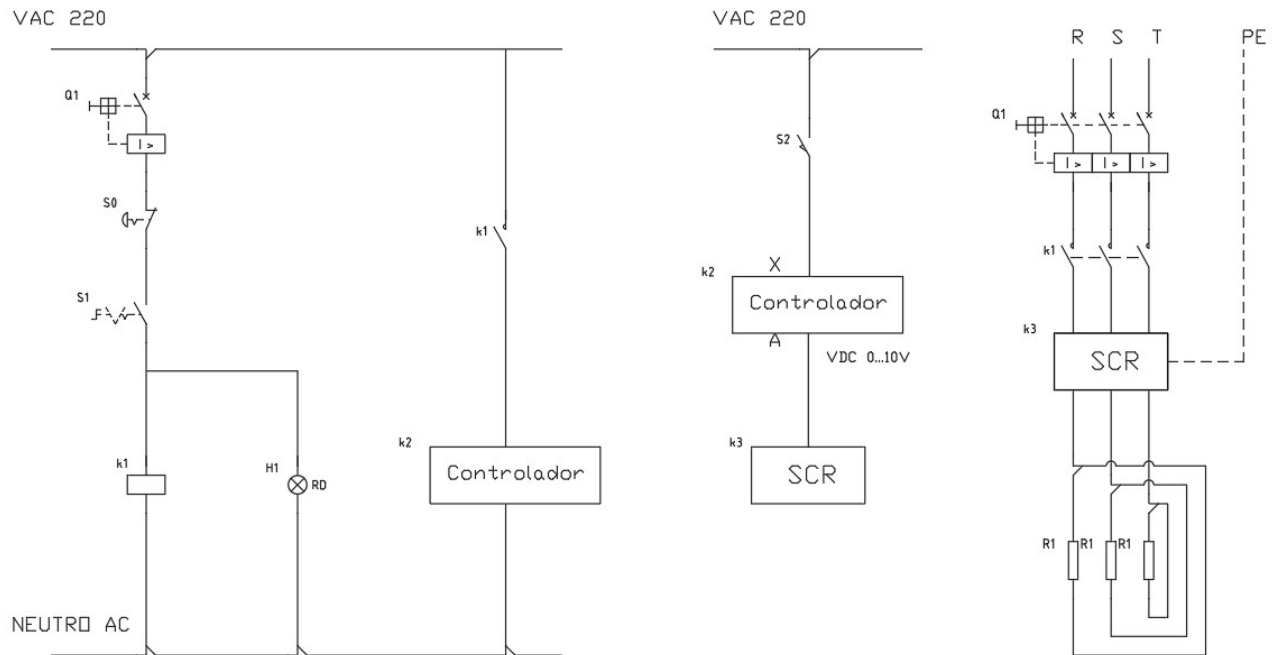
$$L_e = \frac{376 \cdot 12mm}{1000} = 4.512 m$$

### 7.2.7. Sistema de mando y potencia

Para comandar el funcionamiento del horno y para la entrega de potencia se hizo uso del circuito mostrado en la figura 14.

**Figura 14**

*Circuito de mando y potencia.*



**Nota:** Realizado por los autores.

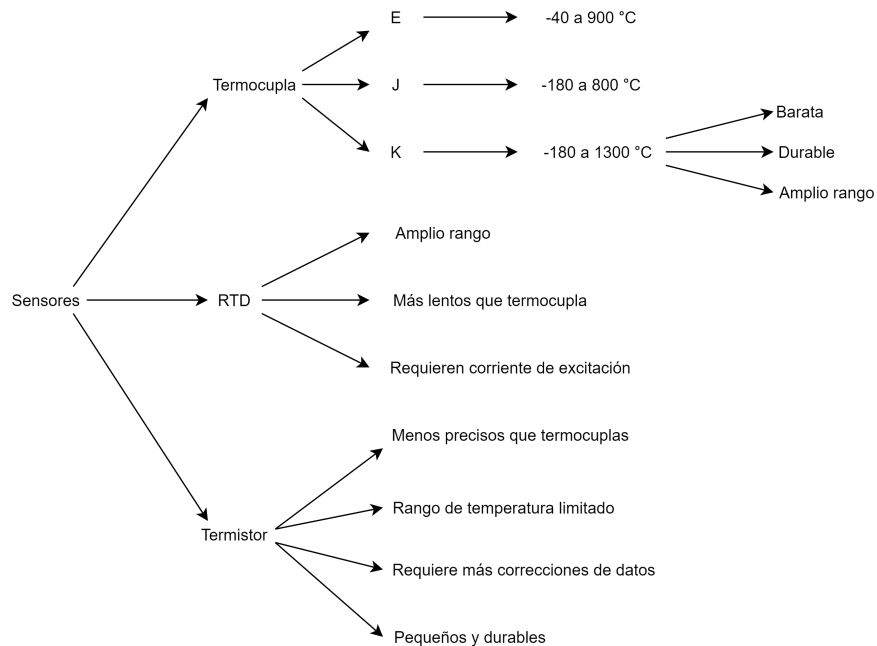
Los componentes necesarios para el mando, control y potencia del horno fueron los siguientes:

- Sensor de temperatura

Para la selección del sensor de temperatura se hizo uso de un árbol de decisión que se muestra en la figura 15, en el cual se toman en cuenta los sensores más comunes y disponibles en el mercado.

**Figura 15**

*Árbol de decisión para selección del sensor de temperatura.*



**Nota:** Realizado por los autores.

Como resultado se obtiene que se va a utilizar una termocupla de tipo K debido a que es fácilmente encontrada en el mercado, su costo es bajo, es duradera y el rango de medición es amplio, adicionalmente este tipo de sensores son basados en voltaje, es decir, el voltaje de salida varía en función de la temperatura.

Debido a las largas dimensiones del horno se optó por hacer uso de dos sensores de temperatura, ubicados en extremos opuestos para que de esta manera se pueda realizar un control más exacto de la temperatura.

■ **Controlador**

El controlador de temperatura escogido fue el modelo CN401 de la marca Omega en virtud de que posee dos entradas analógicas para el uso de los sensores tipo K; del mismo modo, se optó por este modelo debido a su alta calidad y reconocimiento de marca, además de características importantes como: programación de PID, PI o PD,

salida analógica de 0 a 10 V DC, alarma, programación de funciones y programación por medio de teléfonos inteligentes. La figura 16 muestra el controlador seleccionado.

### Figura 16

*Controlador de temperatura CN401.*



**Nota:** Obtenido de Omega (2022)

- Variador de potencia (SCR)

Para la entrega directa de potencia a los elementos resistivos fue necesario un variador de potencia, tomando en cuenta que existen otras formas de realizar esta tarea haciendo uso de contactores mecánicos o relés de estado sólido, sin embargo, estos no permiten un control continuo y tan exacto como con un SCR, además de que al cambiar entre estado de prendido y apagado de manera continua la vida útil de las resistencias decrementa en gran manera. Las principales ventajas que presentan los variadores son: resolución infinita, fiabilidad con mínimo mantenimiento, alta eficiencia, respuesta rápida y reducción de consumo eléctrico (Advanced Energy Industries, 2017).

La selección del SCR se dió en función de la corriente de línea del horno, siendo esta de 24.1 A y aplicando un factor de seguridad de 1.5 se obtiene 35.15 A, de modo que el modelo DIN-A-MITE C trifásico de Watlow cumple con los requerimientos antes expresados y se muestra en la figura 17.



## Figura 17

*Variador de potencia Watlow.*



**Nota:** Obtenido de Watlow (2005)

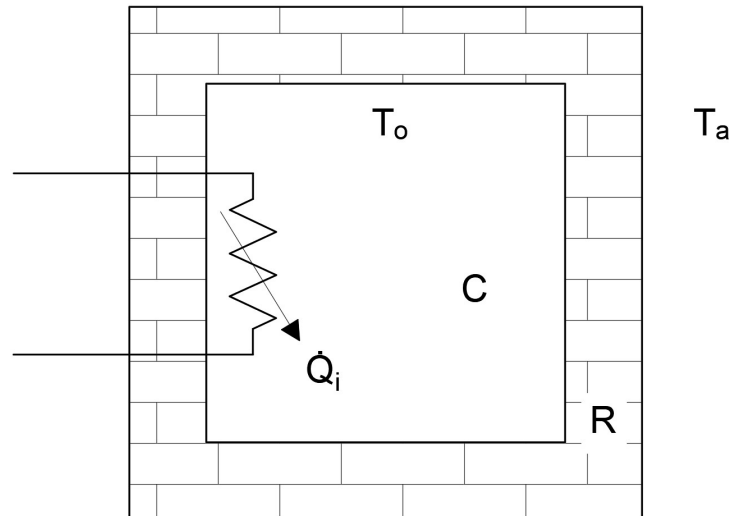
- Componentes trifásicos  
Para el disyuntor y contactor se necesitó que estos componentes resistan un voltaje de 220 V y una corriente de hasta 35 A.
- Componentes monofásicos  
Los componentes monofásicos necesarios fueron un breaker monofásico, pulsante de emergencia, interruptor On/Off y luz piloto. El voltaje de operación fue de 220 V AC.

### 7.2.8. Sistema de control

Fue necesaria la obtención de un sistema de control por retroalimentación que permita regular la temperatura interior, primero encontrando la función de transferencia del horno partiendo del esquema de la figura 18.

## Figura 18

*Esquema representativo del horno.*



**Nota:** Realizado por los autores.

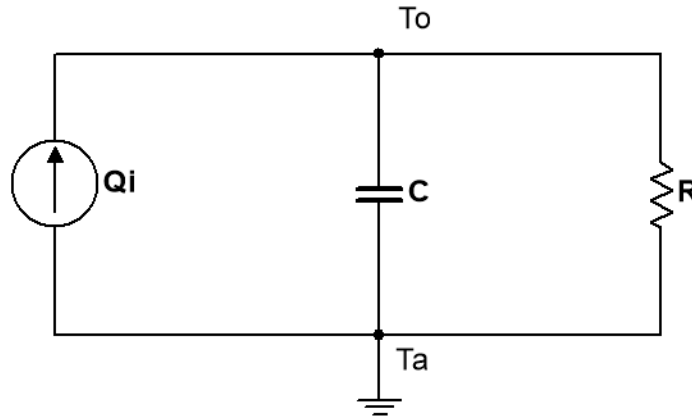
Es posible representar los elementos de un sistema térmico como elementos eléctricos facilitando así la obtención de un modelo matemático que represente el sistema, teniendo así que:

- Fuente de calor ( $\dot{Q}_i$ )  $\rightarrow$  Fuente de corriente
- Capacitancia térmica ( $C$ )  $\rightarrow$  Capacitor
- Resistencia térmica ( $R$ )  $\rightarrow$  Resistencia eléctrica
- Temperatura interior ( $T_o$ )  $\rightarrow$  Voltaje
- Temperatura ambiente ( $T_a$ )  $\rightarrow$  Voltaje

Posteriormente se obtuvo el circuito equivalente que puede ser observado en la figura 19 y en base al cual se obtuvo la función de transferencia del sistema.

**Figura 19**

*Circuito equivalente del horno.*



**Nota:** Realizado por los autores.

$$-Q_i + i_C + i_R = 0$$

$$-Q_i + C \frac{d(T_o - T_a)}{dt} + \frac{T_o - T_a}{R} = 0$$

$$-Q_i + C \frac{dT_o}{dt} + \frac{T_o}{R} = 0$$

$$C \cdot T_o' + \frac{T_o}{R} = Q_i$$

$$C[S \cdot T_o(S) + T_o(0)] + \frac{T_o(S)}{R} = Q_i(S)$$

$$C \cdot S \cdot T_o(S) + \frac{T_o(S)}{R} = Q_i(S)$$

$$T_o(S) \left[ C \cdot S + \frac{1}{R} \right] = Q_i(S)$$

$$T_o(S) \left[ \frac{R \cdot C \cdot S + 1}{R} \right] = Q_i(S)$$

$$\frac{T_o(S)}{Q_i(S)} = \frac{R}{R \cdot C \cdot S + 1}$$

Tomando en cuenta que el valor de la resistencia se obtiene en función de los materiales de las paredes y el valor de la capacitancia en función del medio contenido dentro del horno, que en este caso es el aire, se tiene:

$$R = \frac{1}{K_{L1}} + \frac{1}{K_{L2}} + \frac{1}{K_F} + \frac{1}{K_A} \quad (26)$$

$$R = \frac{1}{0.24} + \frac{1}{0.23} + \frac{1}{0.19} + \frac{1}{15}$$

$$R = 13.85$$

$$C = m \cdot c \quad (27)$$

$$C = 0.1044 \cdot 1006$$

$$C = 104.9839$$

Donde:

$K$ = Conductividad térmica del material	$[W/mK]$
$m$ = Masa de aire contenida dentro del horno	$[kg]$
$c$ = Calor específico del aire a temperatura ambiente	$[J/kgK]$

Teniendo de esta manera la función de transferencia siguiente que modela el comportamiento del horno:

$$G = \frac{13.85}{1454s + 1}$$

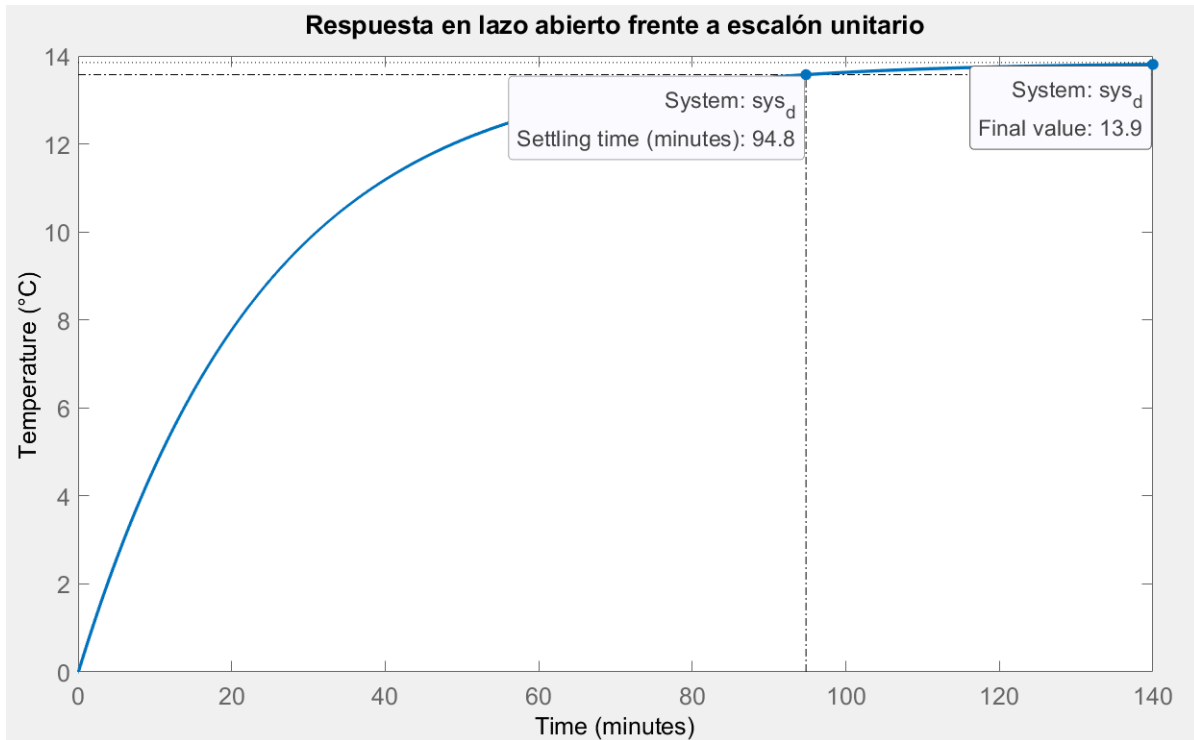
Consecuentemente fue necesario diseñar un controlador para obtener una respuesta sin error en estado estable y con una respuesta en el tiempo más rápida por lo que primero se tuvo que discretizar la función de transferencia, para esto se tomó en cuenta un tiempo de muestreo de 5 segundos pues es el tiempo de respuesta de una termocupla tipo K (Omega, 2019). Al usar un tiempo menor a 5 segundos los datos obtenidos son repetidos agregando ningún valor útil al control, por otro lado es posible usar un tiempo mayor a 5 segundos, sin embargo, el controlador escogido es completamente capaz de muestrear la señal bajo este tiempo y para evitar problemas de exactitud se decidió aplicar el tiempo de muestreo menor, teniendo de esta manera que la función de transferencia en tiempo discreto es:

$$Gd = \frac{0.047545}{z - 0.9966}$$

La figura 20 muestra el comportamiento del sistema discreto en lazo abierto frente a una entrada de tipo escalón unitario y como se puede observar la respuesta no sigue la referencia; en lo que se refiere al tiempo de asentamiento, es bastante similar al tiempo de calentamiento obtenido mediante (18).

**Figura 20**

*Respuesta del sistema frente a una entrada de tipo escalón unitario.*

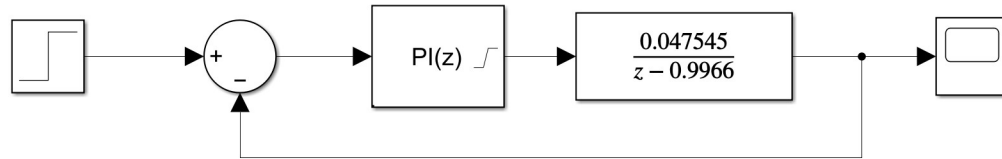


**Nota:** Realizado por los autores.

Se decidió implementar un controlador PI para corregir el error en estado estable, así como reducir el tiempo de asentamiento para poder calentar más rápidamente el horno y debido a que se trata de un sistema de primer orden, es estable por naturaleza y no es necesaria la acción completa de un PID. La figura 21 muestra la implementación en Simulink de lazo cerrado con acción del controlador.

## Figura 21

Implementación en Simulink del control PI.



**Nota:** Realizado por los autores.

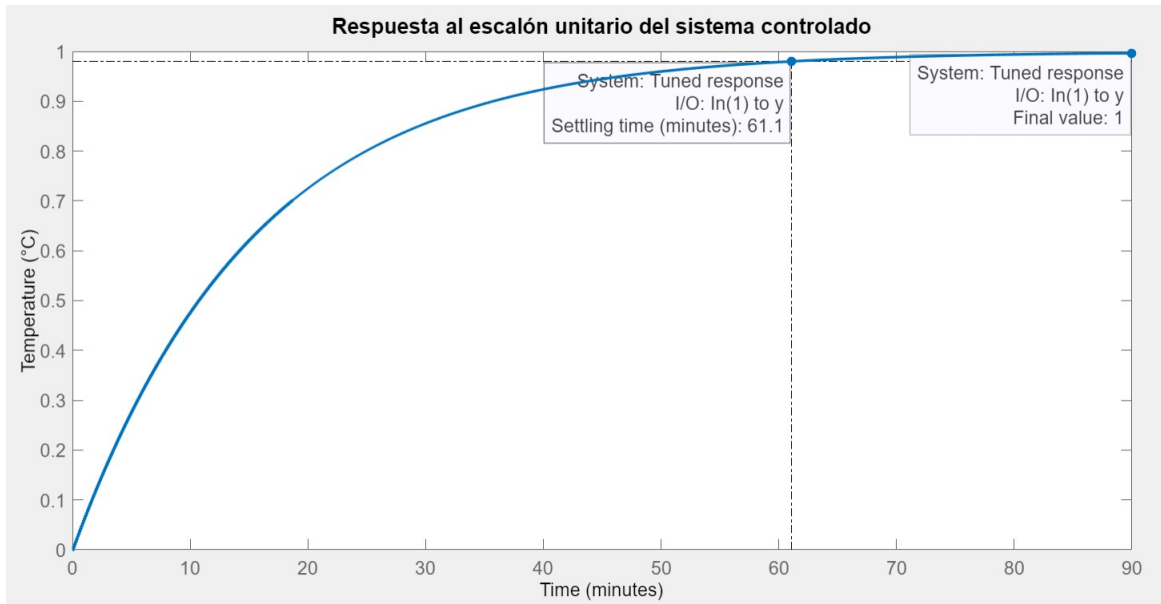
Para la sintonización del controlador se optó por usar el método de Ziegler-Nichols en donde se incrementa la ganancia proporcional hasta llegar a un rango marginalmente estable obteniendo así la ganancia ultima ( $K_u$ ); así pues el valor de la ganancia proporcional pasa a ser  $0.5 \cdot K_u$  y el integral  $K_u/1.2$ . No obstante, la respuesta obtenida presentaba error en estado estable por lo que se decidió usar otra herramienta llamada Tuner que se encuentra dentro del ambiente Simulink en el bloque de control PI, para el cual los parámetros fueron modificados en base de un tiempo de asentamiento deseado de 60 minutos y tomando en cuenta que la entrada no puede ser mayor a 9150 debido a que este es el valor máximo de potencia que pueden entregar los elementos resistivos. Finalmente se obtuvo que el parámetro de ganancia proporcional e integral fueron de:

$$K = 0.113$$
$$I = 7.66 \cdot 10^{-5}$$

En la figura 22 se puede apreciar la respuesta obtenida una vez aplicado el control PI, en la cual el tiempo de asentamiento es de 61.1 minutos y no existe un error en estado estable pues el valor final es de 1, tomando cuenta que la entrada fue un escalón unitario.

**Figura 22**

*Respuesta frente al escalón unitario del sistema controlado.*



**Nota:** Realizado por los autores.

### **7.3. Evaluación del diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.**

#### **7.3.1. Análisis de flujo de calor constante analítico y simulado**

##### **7.3.1.1. Consideraciones para el análisis.**

1. La transferencia de calor es transitoria, ya que existe cambio con el tiempo.
2. La transferencia de calores unidimensional, puesto que el área superficial de la pared es grande en relación con su espesor y las condiciones térmicas en ambos lados son uniformes.
3. Propiedades térmicas constantes vistas en las tablas 5, 6 y 8.
4. Se dispone de generación de calor interna.
5. La parte exterior del horno está bien aislada, de modo que todo el calor generado en las resistencias de alambre se transfiere a la pared a través de superficie interior.



6. La calidad de la malla en la simulación debe ser mayor al 70% para establecer resultados basados en elemento finitos.

### 7.3.1.2. Mallado del sistema.

Para el objetivo de un mallado superior al 70%, se considero de la siguiente manera.

1. Tamaño de elementos no superior a 5mm.
2. Resolución de 4 respecto la calidad.
3. Grosor de linea media.
4. Utilizar un comportamiento mecánico agresivo respecto al limite de error.
5. Una transición de elementos lenta.

Obteniendo un resultado de malla de 76%.

### 7.3.1.3. Análisis de flujo de calor.

El horno al estar expuesto a un flujo constante por acción de las resistencias de alambre, las paredes internas aplican directamente el concepto de balance de energía, la conducción de calor unidireccional y la ecuación diferencial basado en la ley de enfriamiento de Newton.

En la figura 23, se muestra el horno sometido a simulación, donde el flujo de calor es aplicado directamente a dos de sus paredes interiores para simular el comportamiento del calentamiento y la homogeneización de la temperatura en su primera capa de aislante térmico.

El flujo viene dado por la ecuación:

$$qs = \frac{P}{As} \quad (28)$$

Donde:

$$\begin{aligned} qs &= \text{Flujo de calor} && [W/m^2] \\ P &= \text{Potencia} && [W] \\ As &= \text{Área superficial} && [m^2] \end{aligned}$$

Entonces:

$$qs = \frac{1902W}{0.7m \cdot 0.35m}$$

$$qs = 7755.1 \frac{W}{m^2}$$

#### 7.3.1.4. Comprobación analítica del flujo de calor.

La conducción de calor en solidos semi infinitos con flujo constante, viene dada por la siguiente ecuación:

$$T(x,t) - Ti = \frac{qs}{k} \left[ \frac{\sqrt{4\alpha t}}{\pi} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) - \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \right] \quad (29)$$

Donde:

$T(x,t)$	= Temperatura en la distancia x en el instante t	[°C]
$Ti$	= Temperatura inicial	[°C]
$qs$	= Flujo de calor	[W/m <sup>2</sup> ]
$k$	= Conductividad térmica	[W/m·°C]
$\alpha$	= Difusividad térmica	[m <sup>2</sup> /s]
$t$	= Tiempo	[s]
$x$	= Distancia desde la superficie	[m]
$\text{erfc}$	= Función error	

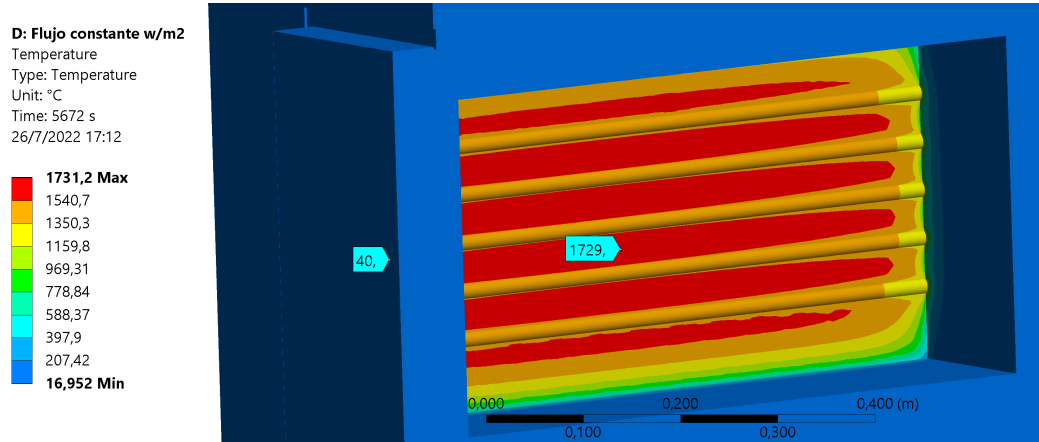
#### Cálculo de la temperatura superficial en el tiempo de 5672 segundos T(0,5672)

$$T(0,5672) = 1760.44 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En la figura 23, se verifica el resultado analítico, como el horno no puede alcanzar la temperatura calculada debido a la limitada capacidad de las resistencias de alambre, es necesario observar en la tabla 9, que el horno necesita de menor tiempo para cumplir con su comportamiento de calentamiento, esto se logró en aproximadamente 3240 segundos, por lo cual es necesario simular y calcular con un nuevo tiempo.

### Figura 23

*Flujo constante aplicado a una pared lateral con un tiempo de simulación de 5672 segundos.*



**Nota:** Elaborado por los autores.

### Tabla 9

*Gradiente de temperatura simulado con un tiempo total de 5672 segundos.*

Tiempo (s)	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Promedio (°C)
56,72	9,405	180,81	26,07
113,44	10,566	253,62	31,076
239,77	13,822	361,58	41,853
618,75	15,737	551,69	72,337
1185,9	16,002	732,07	114,29
1753,1	16,009	871,91	153,66
2320,3	16,03	993,88	190,86
2887,5	16,074	1118,4	226,21
3454,7	16,151	1253,1	259,96
4021,9	16,274	1382,5	292,27
4589,1	16,452	1506,9	323,32
5156,3	16,69	1626,8	353,2
5672,0	16,952	1731,2	379,23

**Nota:** Elaborado por los autores basado en los datos generados en la simulación.

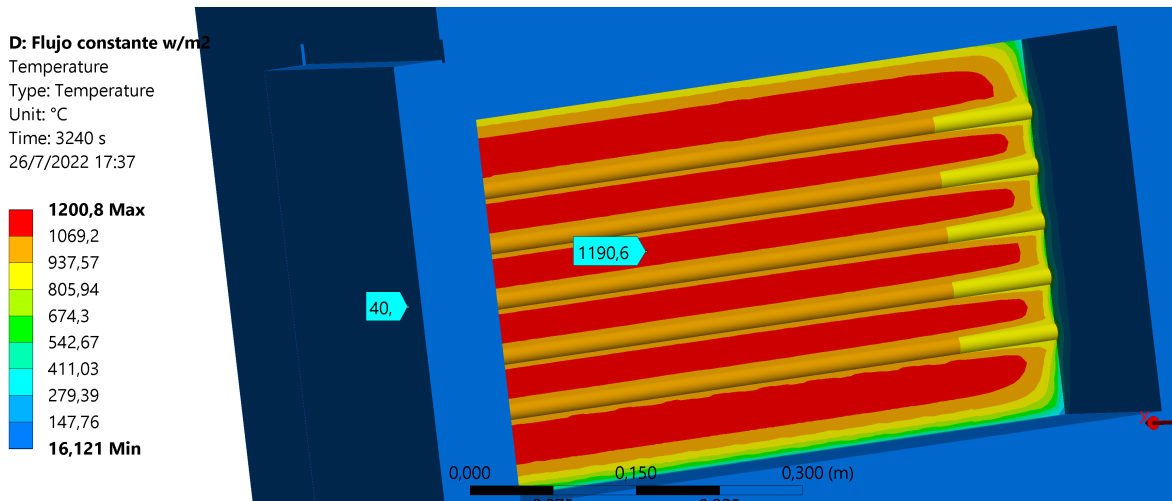
### Calculo de la temperatura superficial en el tiempo de 3210 segundos T(0,3240)

$$T(0,3240) = 1310.53 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En la figura 24, se comprobó el resultado analítico y se difirió por simulación que el tiempo de calentamiento del horno es en 3240 segundos y en la figura 24, se muestra el gradiente de temperatura y el cambio hasta llegar a los 1200 grados centígrados.

#### Figura 24

*Flujo constante aplicado a una pared lateral con un tiempo de simulación de 3240 segundos.*



**Nota:** Elaborado por los autores.

**Tabla 10**

*Gradiente de temperatura simulado con un tiempo total de 3240 segundos.*

<b>Tiempo (s)</b>	<b>Mínimo (<math>^{\circ}C</math>)</b>	<b>Máximo (<math>^{\circ}C</math>)</b>	<b>Promedio (<math>^{\circ}C</math>)</b>
32,1	11,854	139,12	27,408
64,2	13,263	199,34	29,369
104,02	13,131	251,47	31,081
223,48	15,838	356,53	35,241
544,48	16,00	530,07	44,731
865,48	16,00	654,19	53,474
1186,5	16,001	751,95	61,761
1507,5	16,002	834,53	69,72
1828,5	16,005	908,92	77,423
2149,5	16,011	978,08	84,915
2470,5	16,021	1044,4	92,227
2791,5	16,038	1108,8	99,38
3000,7	16,052	1157,4	103,98
3240,0	16,071	1200,8	108,52

**Nota:** Elaborado por los autores basado en los datos generados en la simulación.

De este modo se verifica que en el transcurso de 3240 segundos la pared llega a la homogeneización de temperatura deseada.

### **7.3.2. Análisis de razón de transferencia de calor**

#### **7.3.2.1. Consideraciones para el análisis**

1. La razón de transferencia de calor rige en estado transitorio.
2. Se analiza con las ecuaciones de enfriamiento de Newton tomando los conceptos de sistemas concentrados.
3. La transferencia de calor hacia el cuerpo durante un periodo de tiempo es igual al incremento o decremento de energía en el cuerpo en el transcurso del mismo periodo de tiempo.

4. El mallado del sistema debe ser mayor al 70% para resultados mas aproximados.

### 7.3.2.2. Mallado del sistema.

Para el objetivo de un mallado superior al 70%, se considero de la siguiente manera.

1. Tamaño de elementos no superior a 5mm.
2. Resolución de 4 respecto la calidad.
3. Grosor de linea alta.
4. Utilizar un comportamiento mecánico agresivo respecto al limite de error.
5. Una transición de elementos rápida.

Como resultado de la aplicación de los parámetros antes establecidos se logro obtener una malla de 75%.

### 7.3.2.3. Razón de transferencia de calor analítico.

El análisis consiste en comprobar cuanta potencia se disipa a lo largo de un tiempo establecido hasta que la primera capa de material aislante se iguale a la temperatura ambiente por el factor de convección del aire.

La razón de la transferencia de calor por convección entre el cuerpo y su medio ambiente en ese tiempo a partir de la ley enfriamiento viene dada por la siguiente ecuación.

$$Q(t) = h \cdot As(T(t) - Ti) \quad (30)$$

Donde:

$Q(t)$	= Razón de transferencia de calor	[W]
$h$	= Coeficiente de convección	[W/m <sup>2</sup> °C]
$As$	= Área superficial	[m <sup>2</sup> ]
$T(t)$	= Temperatura en el instante t	[°C]
$Ti$	= Temperatura ambiente	[°C]

El análisis consiste en comprobar cuanta potencia se disipa a lo largo de un tiempo establecido hasta que la primera capa de material aislante se iguale a la temperatura ambiente

por el factor de convección del aire.

Entonces:

$$Q(3240) = 14504 \text{ W}$$

Las mediciones realizadas se representan en la tabla 11, donde se considera un tiempo de simulación de 3240 segundos.

**Tabla 11**

*Vatios disipados.*

<b>Tiempo (s)</b>	<b>Medición de la sonda (W)</b>
56,72	26302
113,44	1414,9
241,12	647,59
624,14	380,95
1191,3	244,2
1758,5	172,29
2325,7	122,76
2892	82,887
3240,0	82,827

**Nota:** Elaborado por los autores basado en los datos generados en la simulación.

### **7.3.3. Análisis estructural de la mesa de soporte**

#### **7.3.3.1. Consideraciones para el análisis.**

1. Estructura metálica construida con tubo estructural A36 con valores constantes determinadas por su norma de calidad SAE J 403 1008.
2. La estructura metálica debe soportar el esfuerzo mínimo que genera el peso del horno.

El análisis partió obteniendo la fuerza normal de cada uno de los pies de la mesa donde el peso distribuido sobre la mesa se dividió para cada pie.

El esfuerzo unitario viene definido por la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (31)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \sigma &= \text{Esfuerzo} && [Pa] \\ P &= \text{Fuerza ejercida en cada pie} && [N] \\ A &= \text{Área transversal} && [m^2] \end{aligned}$$

Se parte del criterio de Von Misses para determinar el limite elástico de la mesa de soporte, partiendo de la siguiente ecuación.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}[\sigma_x - \sigma_y]^2 + [\sigma_y - \sigma_z]^2 + [\sigma_z - \sigma_x]^2 + 6[\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2]} \quad (32)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \sigma_{VM} &= \text{Criterio de Von Misses} && [Pa] \\ \sigma_x &= \text{Esfuerzo total en la dirección x} && [Pa] \\ \sigma_y &= \text{Esfuerzo total en la dirección y} && [Pa] \\ \sigma_z &= \text{Esfuerzo total en la dirección z} && [Pa] \\ \tau_{xy} &= \text{Esfuerzo cortante en la dirección xy} && [Pa] \\ \tau_{yz} &= \text{Esfuerzo cortante en la dirección yz} && [Pa] \\ \tau_{xz} &= \text{Esfuerzo cortante en la dirección xz} && [Pa] \end{aligned}$$

La deformación unitaria viene dada por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (33)$$

Donde:

$$\varepsilon = \text{Deformación unitaria} \quad [m/m]$$



$$\begin{aligned}\sigma &= \text{Esfuerzo} && [Pa] \\ E &= \text{Modulo de Young} && [Pa]\end{aligned}$$

La variación longitudinal viene dada por la siguiente ecuación:

$$\delta = \varepsilon \cdot L \quad (34)$$

Donde:

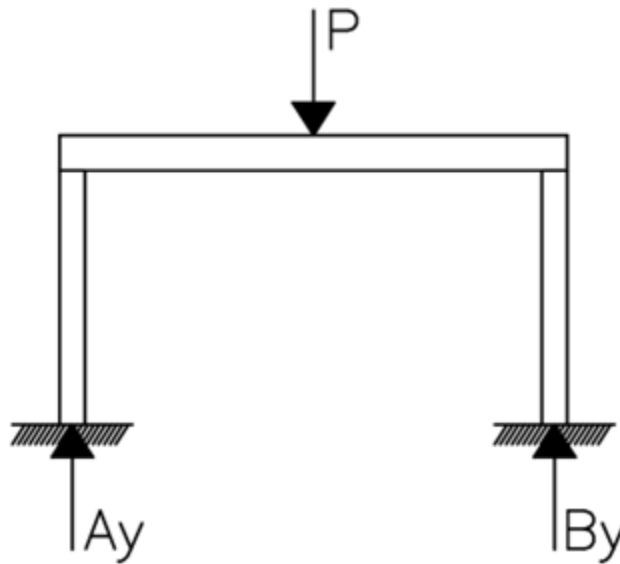
$$\begin{aligned}\delta &= \text{Variación longitudinal} && [m] \\ \varepsilon &= \text{Deformación unitaria} && [m/m] \\ L &= \text{Longitud original} && [m]\end{aligned}$$

### 7.3.3.2. Diagrama de cuerpo libre del esquema de la mesa de soporte.

En la figura 25, se presenta el diagrama de cuerpo libre de la mesa utilizado para el calculo estructural.

**Figura 25**

*DCL de la mesa de soporte.*



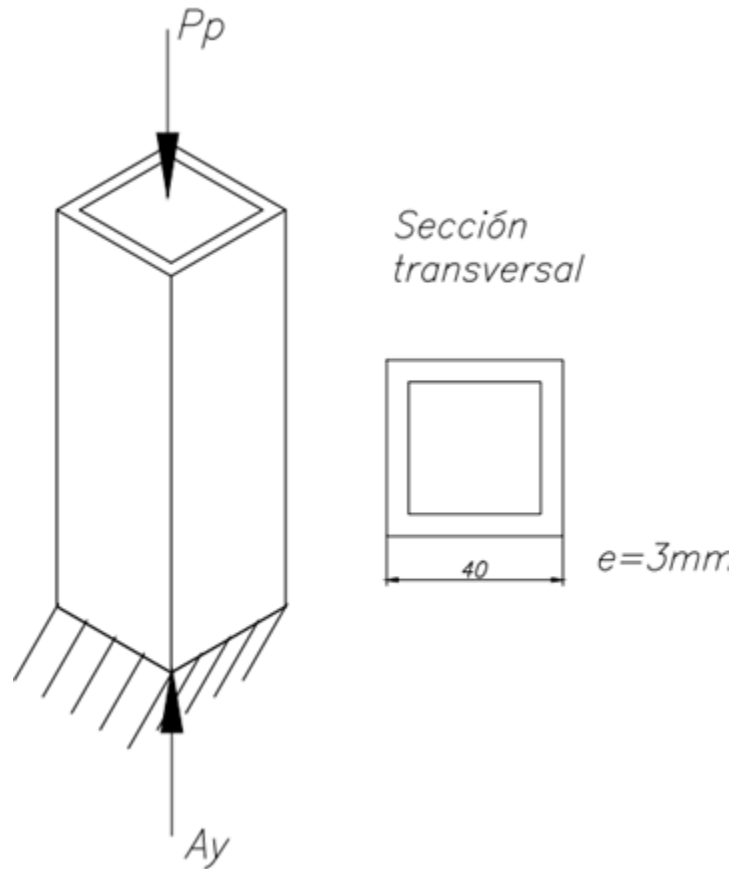
**Nota:** Elaborado por los autores.

### 7.3.3.3. Diagrama de cuerpo libre de un pie de la mesa sometido a compresión.

En la figura 26, se presenta el diagrama de cuerpo libre de un pie de apoyo de la mesa, utilizado para el análisis de las fuerzas normales dentro del calculo estructural.

**Figura 26**

*DCL de un pie de la mesa de soporte.*



**Nota:** Elaborado por los autores.

### 7.3.3.4. Carga distribuida.

El peso distribuido viene dado por el peso generado por el horno, la placa de soporte y la mesa de soporte. La fuerza normal de un pie de apoyo de la mesa es:

Entonces:

$$A_y = 867,5 \text{ N}$$

$$\sigma = 1,95e6 \text{ Pa}$$

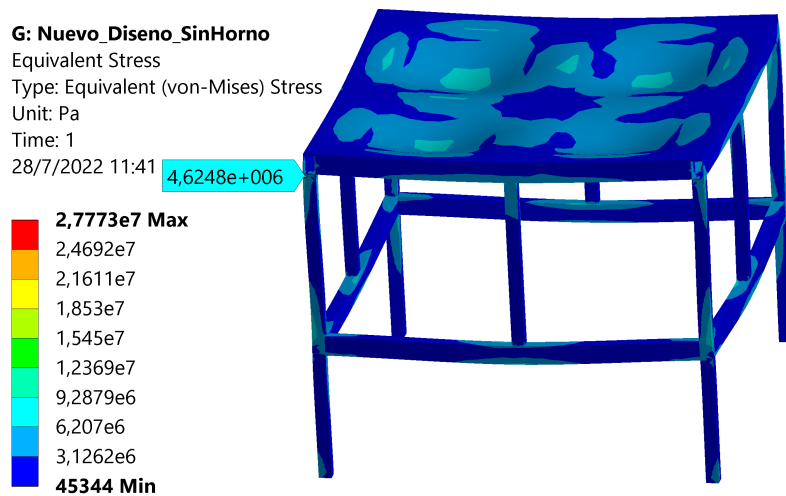
$$\varepsilon = 0,00001 \text{ m/m}$$

$$\delta = 0,00001 \text{ m}$$

En las figuras 27, 28 y 29 se muestran los resultados simulados en cuanto a esfuerzo, deformación y variación longitudinal. Se comprobó y comparó con los resultados analíticos, difiriendo el resultado como admisible debido a que están dentro de la zona de elasticidad del material.

### Figura 27

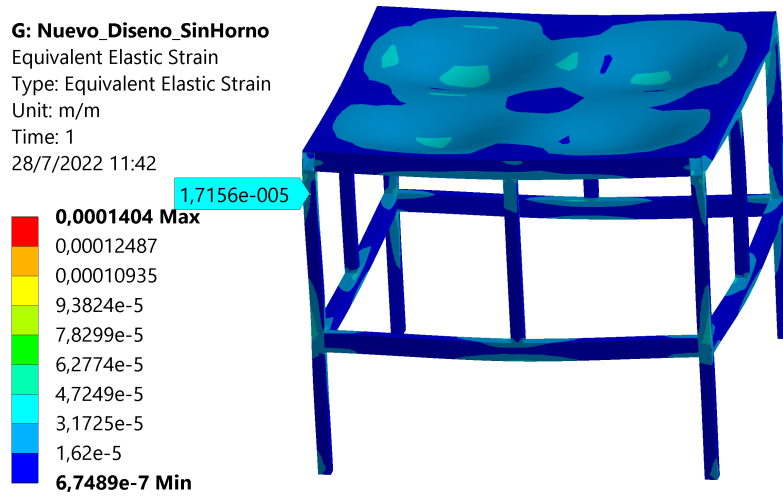
*Esfuerzo máximo de la mesa.*



**Nota:** Elaborado por los autores.

**Figura 28**

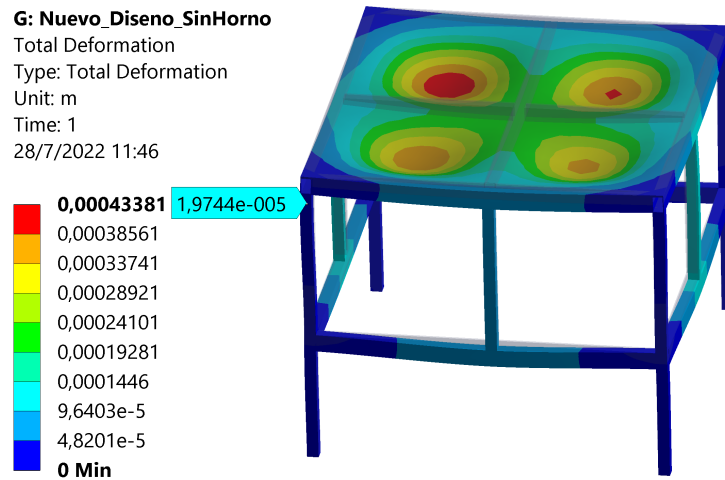
*Deformación máxima.*



*Nota:* Elaborado por los autores.

**Figura 29**

*Variación longitudinal.*



*Nota:* Elaborado por los autores.

### 7.3.4. Análisis estructural de las bisagras de la puerta

#### 7.3.4.1. Consideraciones para el análisis

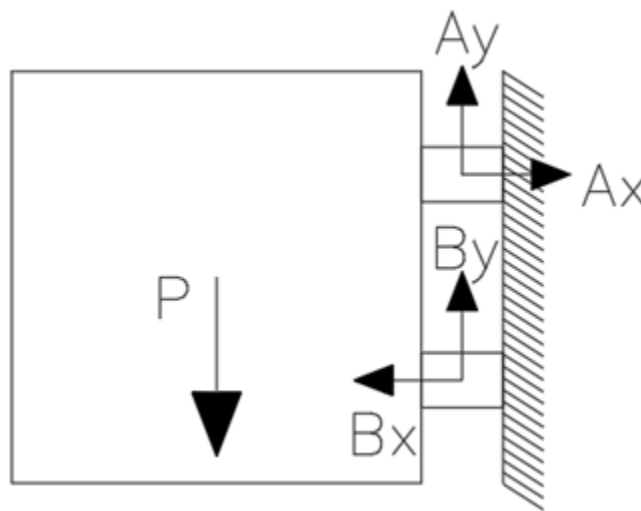
1. Bisagras elaboradas con acero Stainless con constantes propias del material según su denominación 304
2. Las bisagras soportan el esfuerzo generado del peso de la puerta del horno.

#### 7.3.4.2. Diagrama de cuerpo libre de las bisagras de la puerta

En la figura 30, se presenta el diagrama de cuerpo libre de las bisagras de la puerta donde se analizó de la misma forma que la sección anterior.

#### Figura 30

*DCL de las bisagras de la puerta.*



**Nota:** Elaborado por los autores.

Los cálculos parten de la sección anterior y se utilizan las mismas formulas. Entonces:

$$P = 132.43 \text{ N}$$

$$\sigma = 13568.6 \text{ Pa}$$

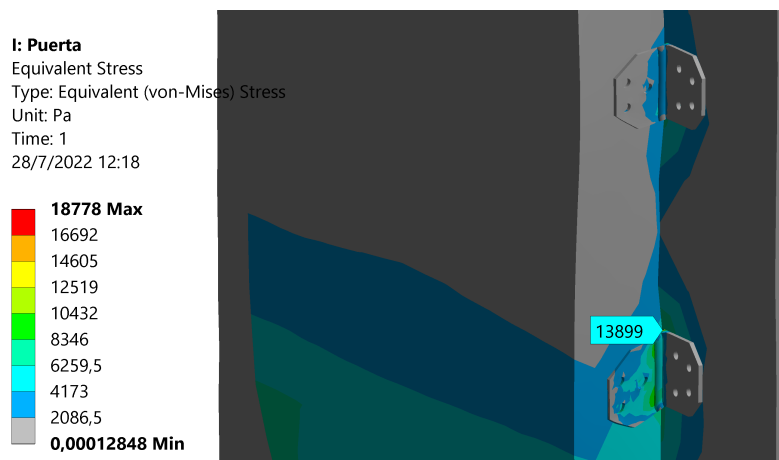
$$e = 6.7 \cdot 10^{-8} \text{ m/m}$$

$$\delta L = 5.09 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

En las figuras 31, 32 y 33 se muestran los resultados simulados en cuanto a esfuerzo, deformación y variación longitudinal. Se comprobó y comparó con los resultados analíticos, difiriendo el resultado como admisible.

### Figura 31

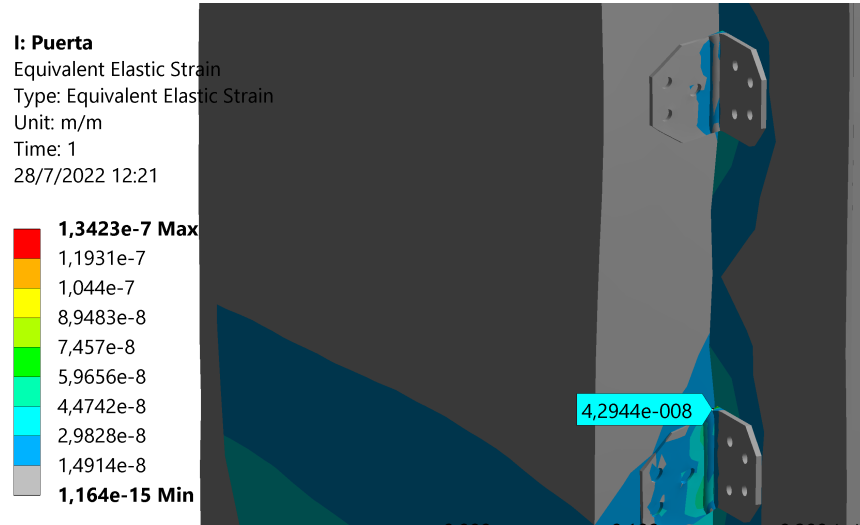
*Esfuerzo máximo de la bisagra de la puerta.*



**Nota:** Elaborado por los autores.

**Figura 32**

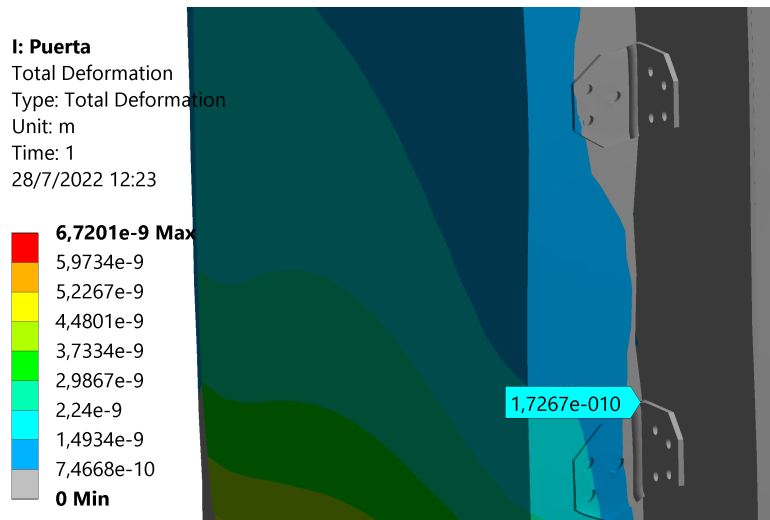
*Deformación máxima de la bisagra de la puerta.*



**Nota:** Elaborado por los autores.

**Figura 33**

*Variación longitudinal de la bisagra de la puerta.*



**Nota:** Elaborado por los autores.

## 8. Resultados

### 8.1. Identificación los parámetros iniciales para el diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.

Los parámetros obtenidos bajo los cuales se diseñó el horno de tratamientos térmicos se muestran en la tabla 12.

**Tabla 12**

*Parámetros iniciales para el diseño del horno.*

Temperatura máxima ( $^{\circ}C$ )	Ancho de la cámara del horno (cm)	Alto de la cámara del horno (cm)	Profundidad de la cámara del horno (cm)	Altura del piso del horno (cm)
1200	35	35	70	105

**Nota:** Elaborado por los autores.

### 8.2. Desarrollo del sistema mecánico, de control y el modelo matemático de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.

Las características físicas finales de las paredes del horno diseñado son mostradas en la tabla 13.



**Tabla 13***Características físicas finales de las paredes.*

<b>Materiales de las paredes</b>	<b>Espesor de las paredes (cm)</b>
Ladrillo refractario K-23	7.6
Ladrillo refractario ER IFB 2300	7.6
Manta de fibra cerámica LTS MaxWool	10.2
Acero inoxidable	0.3
<b>Espesor total</b>	<b>25.7</b>

**Nota:** Elaborado por los autores.

La función de transferencia obtenida que modela el comportamiento del sistema en tiempo discreto con un muestreo de 5 segundos fue la siguiente:

$$Gd = \frac{0.047545}{z - 0.9966}$$

Con respecto a los parámetros de ganancias proporcional e integral los valores obtenidos se muestran a continuación:

$$K = 0.113$$

$$I = 7.66 \cdot 10^{-5}$$

En cuanto al costo total del horno se presenta en tabla 14, la sumatoria de los elementos necesarios para la fabricación y su valor en el mercado local, encontrando de esta manera que el horno tiene un costo aproximado de 3808.58 dólares.

**Tabla 14**

*Costo total del horno en base a sus componentes.*

<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario (Dólares)</b>	<b>Costo Total (Dólares)</b>
Ladrillo refractario 1	50	9.22	461
Ladrillo refractario 2	89	9.22	820.58
Manta cerámica	16	18	22
Plancha de acero	6 m <sup>2</sup>	60	360
Niquelinas	33 m	60	360
SCR	1	400	400
Controlador de temperatura	1	340	340
Termocupla tipo K	2	50	100
Disyuntor 35 A	1	40	40
Contactador 35 A	1	30	30
Breaker monofásico	1	10	10
Pulsante emergencia	1	7	7
Interruptor On/Off	1	7	7
Luz piloto	1	5	5
Perfiles de acero	4	18	72
Bisagras	2	10	20
Cemento refractario	1	150	150
Mano de obra	–	–	300
Tornillos, pernos y otros	–	–	200
<b>TOTAL</b>			<b>3808.58</b>

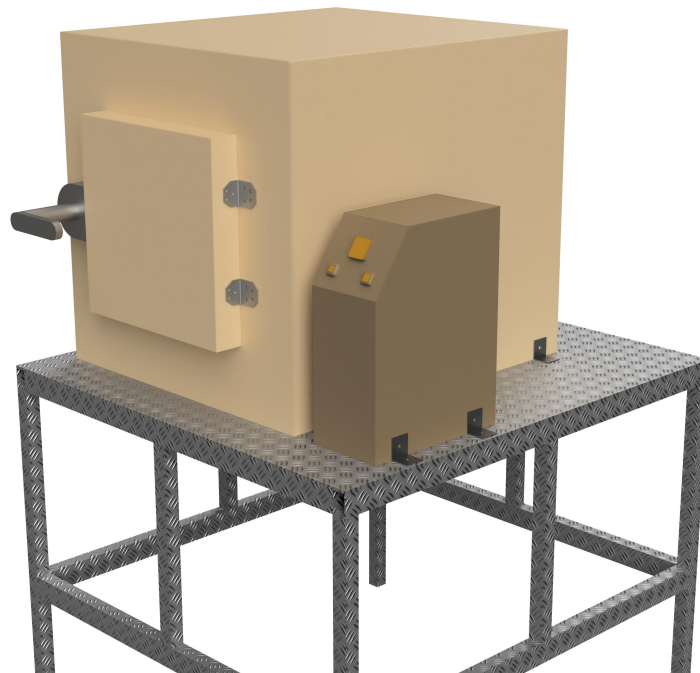
**Nota:** Elaborado por los autores.

Por último, en la figura 34, se aprecia el diseño final del horno en donde la fuente de calor es mediante resistencias eléctricas, se tienen tres capas de elementos refractarios y una final de acero inoxidable, además el panel de control se encuentra ubicado en la parte derecha teniendo dentro de sí los elementos de mando y potencia como el controlador digital, variador de

potencia, elementos de seguridad, etcétera, finalmente, todo el sistema se encuentra apoyado sobre una mesa metálica.

**Figura 34**

*Diseño final propuesto basado en todas las consideraciones tratadas en las anteriores secciones.*



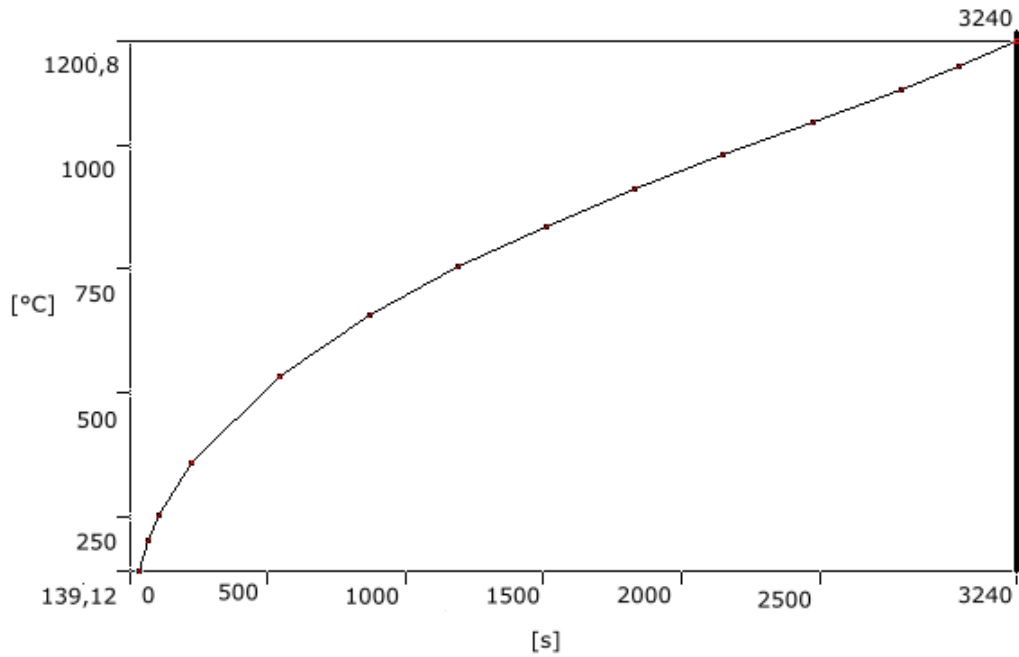
**Nota:** Elaborado por los autores.

### **8.3. Evaluación del diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero S.A.**

En la figura 35, se presenta el comportamiento que llega a desarrollar el horno de tratamientos térmicos empujando un tiempo total de 3240 segundos basado en los datos recogidos en la simulación.

**Figura 35**

*Horno simulado con 3240 segundos.*

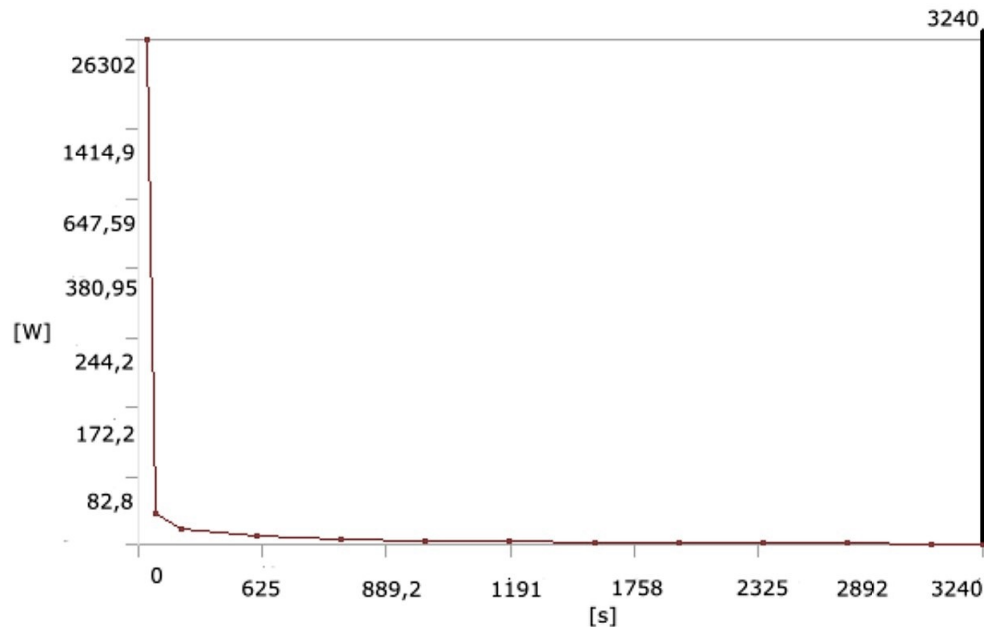


**Nota:** Elaborado por los autores.

En la figura 36, se muestra el tiempo de enfriamiento a razón de vatios disipados, datos recogidos de la simulación empleando un tiempo de enfriamiento de 3210 segundos.

**Figura 36**

*Razón de transferencia.*



**Nota:** Elaborado por los autores.

## 9. Conclusiones

- En base a las necesidades presentadas por la empresa Fibroacero S.A se diseñó un horno de tratamientos térmicos con una cámara interior 35x35x70 cm a una altura de 105 cm y que puede llegar a una temperatura de hasta 1200 °C. De esta manera se permitirá el endurecimiento de diversas piezas fabricadas de acero necesarias para la construcción de productos como cocinas y cilindros de gas.
- El horno diseñado consta de paredes de ladrillos refractarios, una capa de manta de fibra cerámica y una plancha de acero inoxidable teniendo un espesor total de la pared de 25.7 cm. La pared exterior no sobrepasa los 40 °C resguardando así la seguridad de los operarios y la potencia máxima del sistema es de 9.15 kW. El tiempo de calentamiento desde temperatura ambiente hasta 1200 °C es de alrededor de 94 minutos y al implementar un controlador PI se reduce a 61 minutos además de eliminar el error en estado estable.

- En las simulaciones, se pudo observar y verificar la veracidad del comportamiento del horno de tratamientos térmicos, comprobando que es capaz de calentarse a la temperatura deseada de  $1200^{\circ}C$  en el tiempo establecido, llegando a ser hasta más eficiente por su calentamiento en un tiempo de 54 minutos y con un tiempo aproximado de enfriamiento de 142 minutos.
- Adicionalmente se puso a prueba la resistencia de la mesa de soporte, además de las bisagras de la puerta, encargadas de asegurar un equilibrio estático y dinámico al horno. Brindando como resultados esfuerzos admisibles para la carga que soportan y deformaciones mínimas del material, concluyendo que los materiales seleccionados desempeñan un óptimo ciclo de trabajo con el 1% de fallo.

## 10. Recomendaciones

- Para futuros diseños en donde el presupuesto y disponibilidad local lo permita, se recomienda utilizar materiales refractarios de menor conductividad térmica para así conseguir un espesor de paredes menor y en consecuencia un horno de menor peso.
- En caso de que el impacto de las piezas cargadas al horno contra las paredes no sea un factor importante, se recomienda posicionar los elementos resistivos sobre tubos cerámicos para que irradian más libremente.
- Si el desgaste del piso de la cámara es excesivo por la introducción de piezas pesadas a la cámara, se recomienda fabricar un piso interior con esferas cerámicas de alúmina que permitan rodar las piezas al interior.

## Referencias

- Advanced Energy Industries. (2017). *The Many Benefits of SCR Power Control*. IEEE Globalspec Media Solutions.
- Askeland, D. R., Romo Muñoz, J. H., Fulay, P. P., Wright, W. J., y Hernández Lanto, J. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales* (7a ed.). (OCLC: 970446317)
- Astigarraga Urquiza, J. (1994). *Hornos industriales de resistencias: teoría, cálculo y aplicaciones*. Madrid [etc.: McGraw-Hill. (OCLC: 1024044564)
- Bohler. (2021). *Manual de aceros especiales*.
- Budynas, R. G., y Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (9.<sup>a</sup> ed.). México D.F: McGraw-Hill Interamericana. (OCLC: 827776142)
- Cengel, Y. A. (2003). *Termodinámica*. Biblioteca Hernán Malo González.
- Cengel, Y. A. (2011). *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill Interamericana.
- Childs, P. R. N. (2014). *Mechanical design engineering handbook*. Amsterdam: Butterworth-Heinemann. (OCLC: ocn862752217)
- Giberson, D. (2008). *A Compilation of Ideas to Promote the Highest Quality of Element Installation Practice*. The Joppa Press.
- Guillen, V., y Orellana, D. (2017, octubre). Un acercamiento a caracterizar la isla de calor en Cuenca, Ecuador. *Revista Interuniversitaria de Estudios Urbanos de Ecuador*.
- Incropera, F. P., y DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educacion.
- Kalpakjian, S., y Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México, D.F.: Pearson Educacion. (OCLC: 427553368)
- Kanthal. (2018). *Resistance Heating Alloys and Systems for Industrial Furnaces*. Hallstahammar: Kanthal.
- Kern, D. Q. (2008). *Procesos de transferencia de calor* (n.º TJ263 K45).
- Kreith, F., Bohn, M. S., y Salas, R. N. (2001). *Principios de transferencia de calor*. Thomson Learning.
- McDowell, K., Zhong, Y., Webster, K., Gonzalez, H. J., Trimble, A. Z., y Mora, C. (2021, octubre). Comprehensive temperature controller with internet connectivity for plant growth experiments. *HardwareX*, 10, e00238. Descargado 2021-12-16, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2468067221000687> doi: 10.1016/j.ohx.2021.e00238
- Moran, M. J. (2018). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Reverte.

- Nise, N. S. (2006). *Sistemas de control para ingeniería*. Mexico, D.F.: Compañía Editorial Continental. (OCLC: 768470731)
- Omega. (2019). *Thermocouple Response Time*. Descargado 2022-07-17, de <https://www.omega.com/en-us/resources/thermocouples-response-time>
- Omega. (2022). *CN400 Series*. Omega.
- Oven Industries. (s.f.). *Learning - Oven Industries Industrial Temperature Control*. Descargado 2021-11-22, de <https://www.ovenind.com/resources/learning/>
- Sergerlind, L. J. (1984). *Applied finite element analysis*.
- Shackelford, J. F. (2008). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Madrid: Pearson-Prentice-Hall. (OCLC: 920154395)
- Valero, E. (2004). *Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del metodo de los elementos finitos*.
- Watlow. (2005). *DIN-A-MITE Solid-State Power Controller*.



# **ANEXOS**

# Anexo A: Propiedades de ladrillos refractarios



Insulating Our World

## K<sup>®</sup>-23, TC<sup>™</sup>-23, IFB 23 Tile, K-25



Physical Properties	K-23	TC-23	IFB 23 Tile	K-25
Recommended Hot Face use limit,*F (°C)	2600 (1315)	2300 (1260)	2300 (1260)	2500 (1371)
Density, ASTM C 134				
lb/9" straight (kg)	1.93 (0.87)	1.9 (0.85)	2.2 (1.0)	2.3 (1.05)
pcf (kg/m <sup>3</sup> )	31 - 35 (497-560)	30 - 36 (480 - 576)	37 (593)	38 - 41 (593-641)
Melting temperature,*F	2750 (1510)	2750 (1510)	2750 (1510)	2800 (1538)
Modulus of rupture, ASTM C 133				
psi (MPa)	115 (0.79)	105 (0.72)	105 (0.72)	135 (0.93)
Cold crushing strength, ASTM C 133				
psi (MPa)	145 (1.0)	125 (0.86)	125 (0.86)	200 (1.38)
Permanent linear change, %, per ASTM C 210				
@ 2250°F (1232°C)	0 to -0.1	-0.2	0 to -0.1	-
@ 2450°F (1343°C)	-	-	-	-0.3
Deformation under hot load, % @ 10 psi, ASTM C 16				
1½ hr @ 2000°F (1093°C)	0	0.1	0	0
1½ hr @ 2200°F (1204°C)	0.3	-	-	0.1
Coefficient of thermal expansion				
in/in°Fx10-6	3	3	-	3.1
<b>Chemical Analysis, %</b>				
Alumina, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38	38	38.5	46
Silica, SiO <sub>2</sub>	45	45	47.5	37.5
Ferric oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3	0.3	0.4	0.3
Titanium oxide, TiO <sub>2</sub>	1.6	1.6	1.6	1.4
Calcium oxide, CaO	15	15	11	14
Magnesium oxide, MgO	0.1	0.1	0.2	0.1
Alkalies, as, Na <sub>2</sub> O and K <sub>2</sub> O	0.5	0.5	0.3	0.4
<b>Thermal Conductivity, BTU•in./hr•ft<sup>2</sup>•°F (W/m•K), ASTM C 201</b>				
Mean temperature				
@ 500°F (260°C)	0.92 (0.13)	0.95 (0.13)	1.0 (0.14)	1.06 (0.15)
@ 1000°F (538°C)	1.14 (0.16)	1.2 (0.17)	1.3 (0.18)	1.22 (0.18)
@ 1500°F (815°C)	1.39 (0.20)	1.5 (0.22)	1.6 (0.23)	1.38 (0.20)
@ 2000°F (1093°C)	1.64 (0.24)	1.7 (0.24)	1.8 (0.25)	1.54 (0.22)

### Standard Sizes\*

#### K-23, TC-23, K-25

9" x 4½" x 2½" (229mm x 114mm x 63mm)

9" x 4½" x 3" (229mm x 114mm x 76mm)

9" x 6" x 3" (229mm x 152mm x 76mm)

9" x 6½" x 3" (229mm x 171mm x 76mm)

13½" x 4½" x 3" (343mm x 114mm x 76mm)

#### IFB 23 Tile

9" x 9" x 3" to 24½" x 9" x 3" (229mm x 229mm x 76mm to 622mm x 229mm x 76mm)

\* Special sizes available upon request, including arch, wedge and key shapes.

Versión: 01
Aprobó: Fabio Vargas - Ing I+D
Fecha de vigencia: 25/11/2021

**GAMMA**

**ERECOS®**

**CORONA**  
Negocio de Energía

Carrera 49 No. 67 Sur 680  
Sabaneta, Colombia - 055450

Teléfono: [574] 305 8000  
ventas@erecos.com  
Nit: 890.900.121-4

## ER IFB 2300

### Aislamiento térmico

Los ladrillos refractarios aislantes se caracterizan por su baja densidad, la cual le confiere una baja conductividad térmica. Esta propiedad los hace óptimos para ser empleados en hornos industriales donde el ahorro energético es una importante condición de diseño. Son fabricados con materias primas y procesos especiales para obtener alta porosidad, baja densidad y alta refractariedad. Los ladrillos aislantes se utilizan como respaldo de ladrillos densos de mayor refractariedad y conductividad térmica.

### Propiedades

Clasificación	Aislante grupo 23	
ASTM C-155, NTC-815		
Composición química (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	48.0
	SiO <sub>2</sub>	49.0
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.9
	Otros Óxidos	2.1
Máxima temperatura de servicio (°C)	1230	
Densidad volumétrica (gr/cm <sup>3</sup> )	0.6	
NTC - 676, ASTM C - 134		
Resistencia a la compresión en frío (MPa)	1.0	
NTC - 628, ASTM C - 133		
Módulo de ruptura en frío (MPa)	0.7	
NTC - 628, ASTM C - 133		
Cambio lineal permanente temperatura (%) 1230°C	200 °C	0.15
	400 °C	0.18
	600 °C	0.02
	800 °C	0.23
	1000 °C	0.26
	Conductividad térmica (W/mK)	

### Aplicaciones

Ladrillo refractario aislante del grupo 23. Para utilizar a 2.300 °F (1260°C) máximo en la cara caliente. Pueden emplearse como revestimiento de trabajo de hornos, pero únicamente cuando no están sometidos a la abrasión, corrosión o erosión por metales fundidos, escorias ó gases a altas velocidades.

Las propiedades descritas en este documento se basan en los resultados promedio de las pruebas de control sobre lotes de producción industrial utilizando los procedimientos descritos en las normas ICONTEC y ASTM donde ellas sean aplicables, y no deben emplearse para efecto de especificaciones garantizadas. Pueden presentarse variaciones de los resultados dependiendo del tamaño, forma o proceso de fabricación.

## Anexo B: Características de Kanthal A-1

### KANTHAL A-1, APM Wire

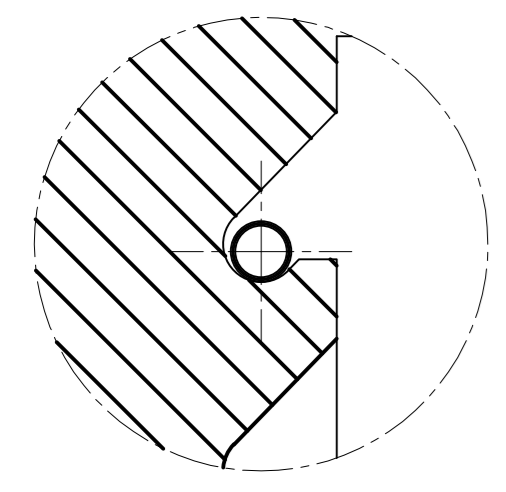
Standard stock items	Alloy	Diameter range mm	Resistivity $\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$	Density $\text{gcm}^{-3}$
■	KANTHAL A-1	10.0-0.050	1.45	7.10
■	KANTHAL APM	10.0-0.20	1.45	7.10

To obtain resistance at working temperature, multiply by the factor  $C_i$  in the following table:

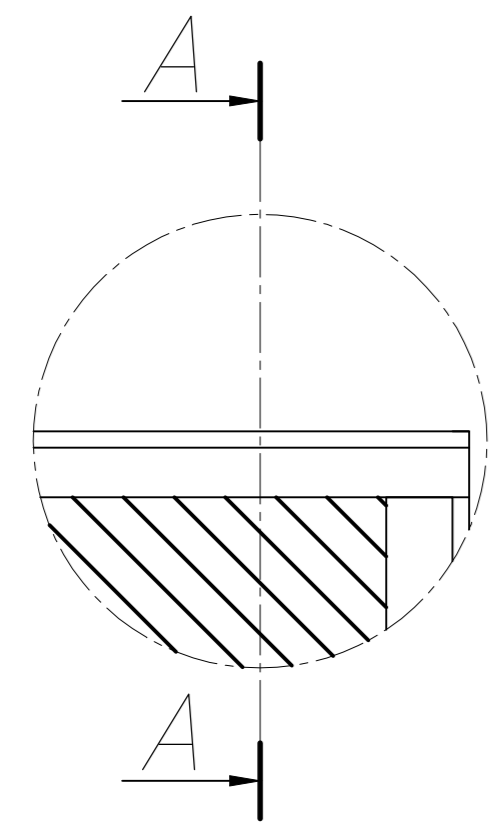
°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
$C_i$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05

Diameter mm	A-1	APM	at 20 °C $\Omega/\text{m}$	Resistance $\text{cm}^2/\Omega^2$ at 20 °C	Weight g/m	Surface area $\text{cm}^2/\text{m}$	Cross sectional area $\text{mm}^2$
10.0	10.0		0.0185	17017	558	314	78.5
9.5	9.5		0.0205	14590	503	298	70.9
	9.27		0.0215	13555	479	291	67.5
8.25	8.25		0.0271	9555	380	259	53.5
8.0	8.0		0.0288	8713	357	251	50.3
7.35	7.35		0.0342	6757	301	231	42.4
7.0	7.0		0.0377	5837	273	220	38.5
6.54			0.0432	4760	239	205	33.6
6.5	6.5		0.0437	4673	236	204	33.2
6.0	6.0		0.0513	3676	201	188	28.3
5.83			0.0543	3372	190	183	26.7
5.5	5.5		0.0610	2831	169	173	23.8
5.0	5.0		0.0738	2127	139	157	19.6
4.75	4.75		0.0818	1824	126	149	17.7
4.62			0.0865	1678	119	145	16.8
4.5	4.5		0.0912	1551	113	141	15.9
4.25	4.25		0.102	1306	101	134	14.2
4.11			0.109	1181	94.2	129	13.3
4.06			0.112	1139	91.9	128	12.9
4.0	4.0		0.115	1089	89.2	126	12.6
3.75	3.75		0.131	897	78.4	118	11.0
3.65			0.139	827	74.3	115	10.5
3.5	3.5		0.151	730	68.3	110	9.62
3.35			0.165	640	62.6	105	8.81
3.25	3.25		0.175	584	58.9	102	8.30
3.2			0.180	558	57.1	101	8.04
3.0	3.0		0.205	459	50.2	94.2	7.07
2.95			0.212	437	48.5	92.7	6.83
2.9	2.9		0.220	415	46.9	91.1	6.61
2.8	2.8		0.235	374	43.7	88.0	6.16
2.65			0.263	317	39.2	83.3	5.52
2.6	2.6		0.273	299	37.7	81.7	5.31
2.5	2.5		0.295	266	34.9	78.5	4.91
2.4			0.321	235	32.1	75.4	4.52
2.34			0.337	218	30.5	73.5	4.30
2.3	2.3		0.349	207	29.5	72.3	4.15
2.25			0.365	194	28.2	70.7	3.98
2.2	2.2		0.381	181	27.0	69.1	3.80
2.05			0.439	147	23.4	64.4	3.30
2.03			0.448	142	23.0	63.8	3.24
2.0	2.0		0.462	136	22.3	62.8	3.14
1.83			0.551	104	18.7	57.5	2.63
1.8	1.8		0.570	99	18.1	56.5	2.54
1.7	1.7		0.639	83.6	16.1	53.4	2.27
1.6			0.695	73.7	14.8	51.2	2.09
1.6			0.721	69.7	14.3	50.3	2.01
1.5	1.5		0.821	57.4	12.5	47.1	1.77
1.4			0.942	46.7	10.9	44.0	1.54
1.3			1.09	37.4	9.42	40.8	1.33
1.2	1.2		1.28	29.4	8.03	37.7	1.13
1.1			1.53	22.6	6.75	34.6	0.950
1.0	1.0		1.85	17.0	5.58	31.4	0.785

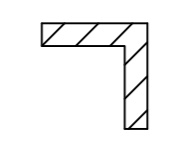
Detalle A



Detalle B

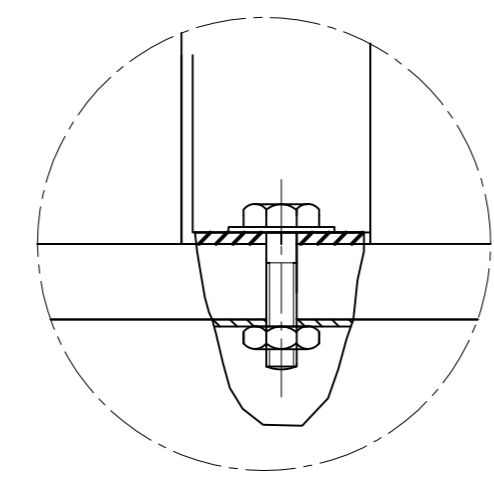


Sección A-A

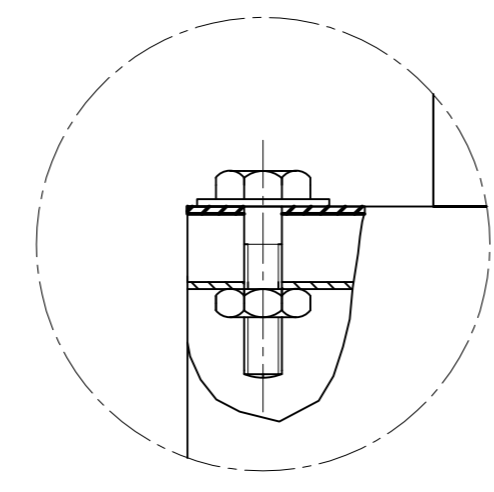


Ángulo 50x50

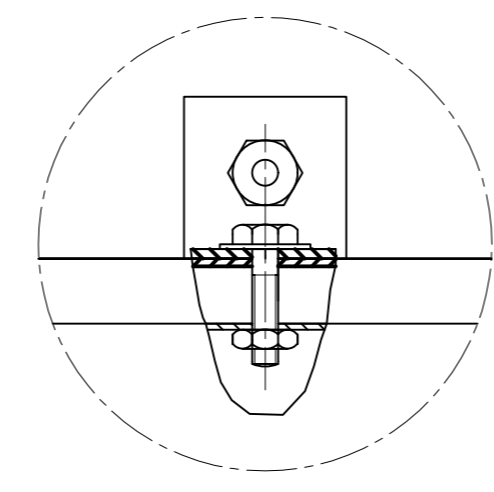
Detalle C



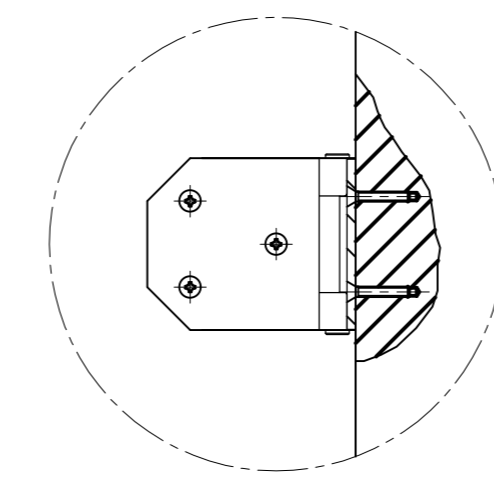
Detalle D



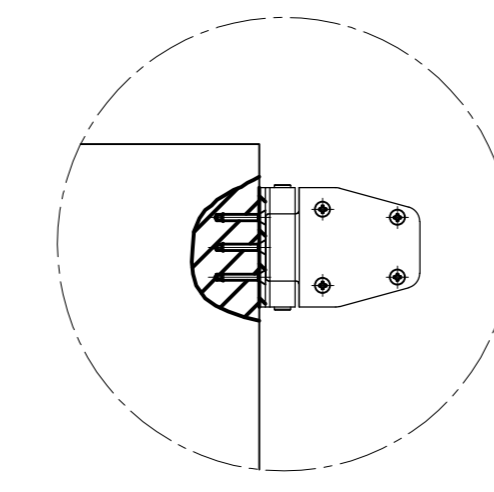
Detalle E



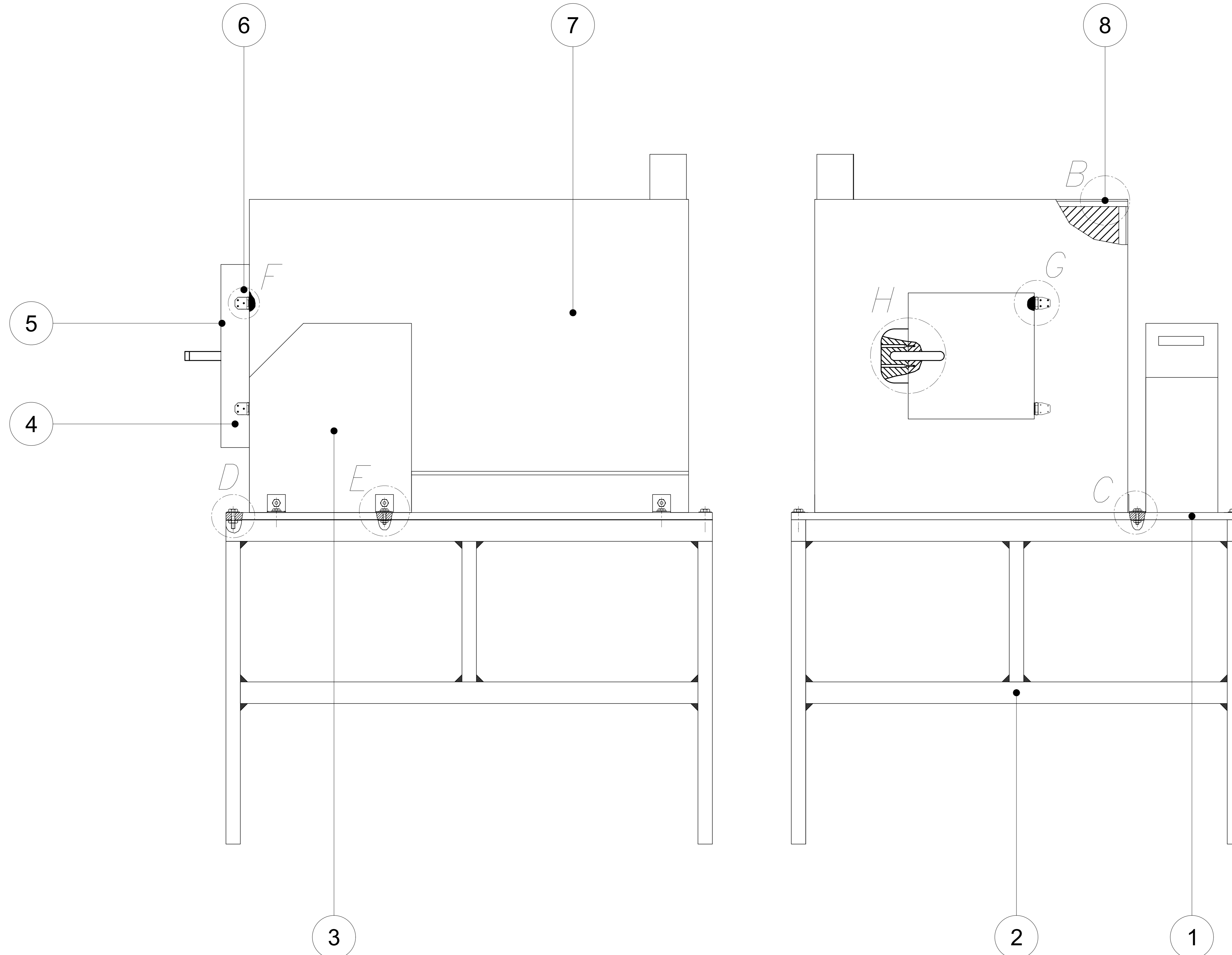
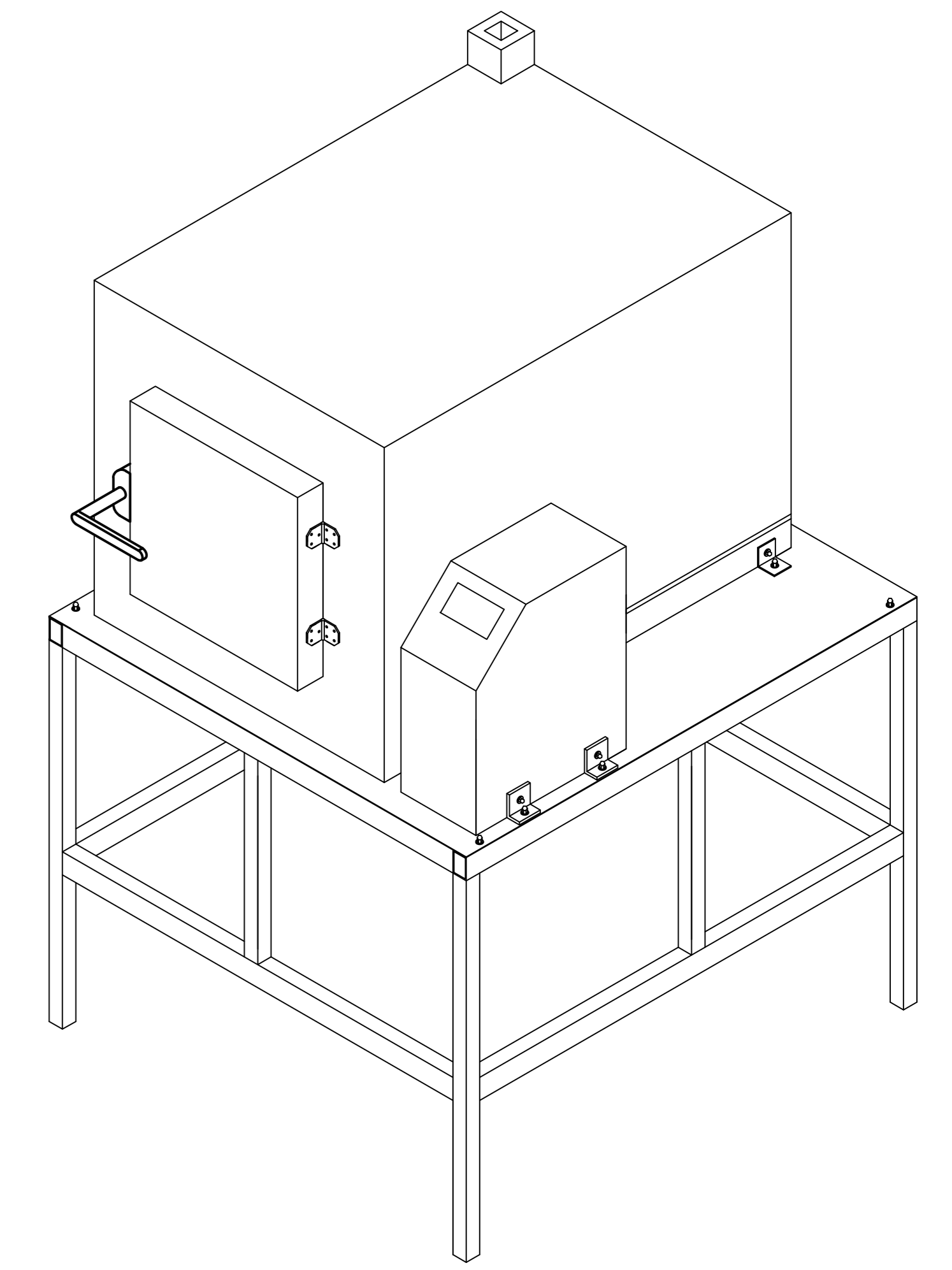
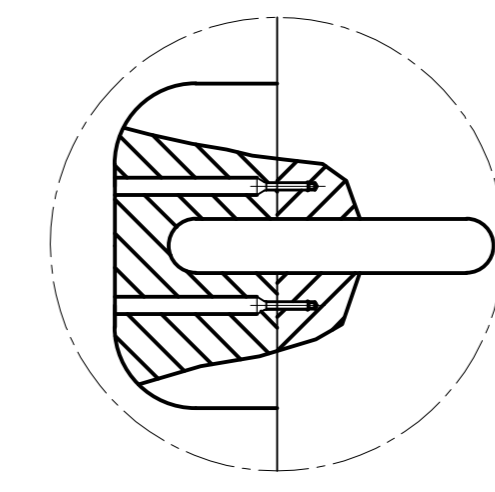
Detalle F



Detalle G



Detalle H



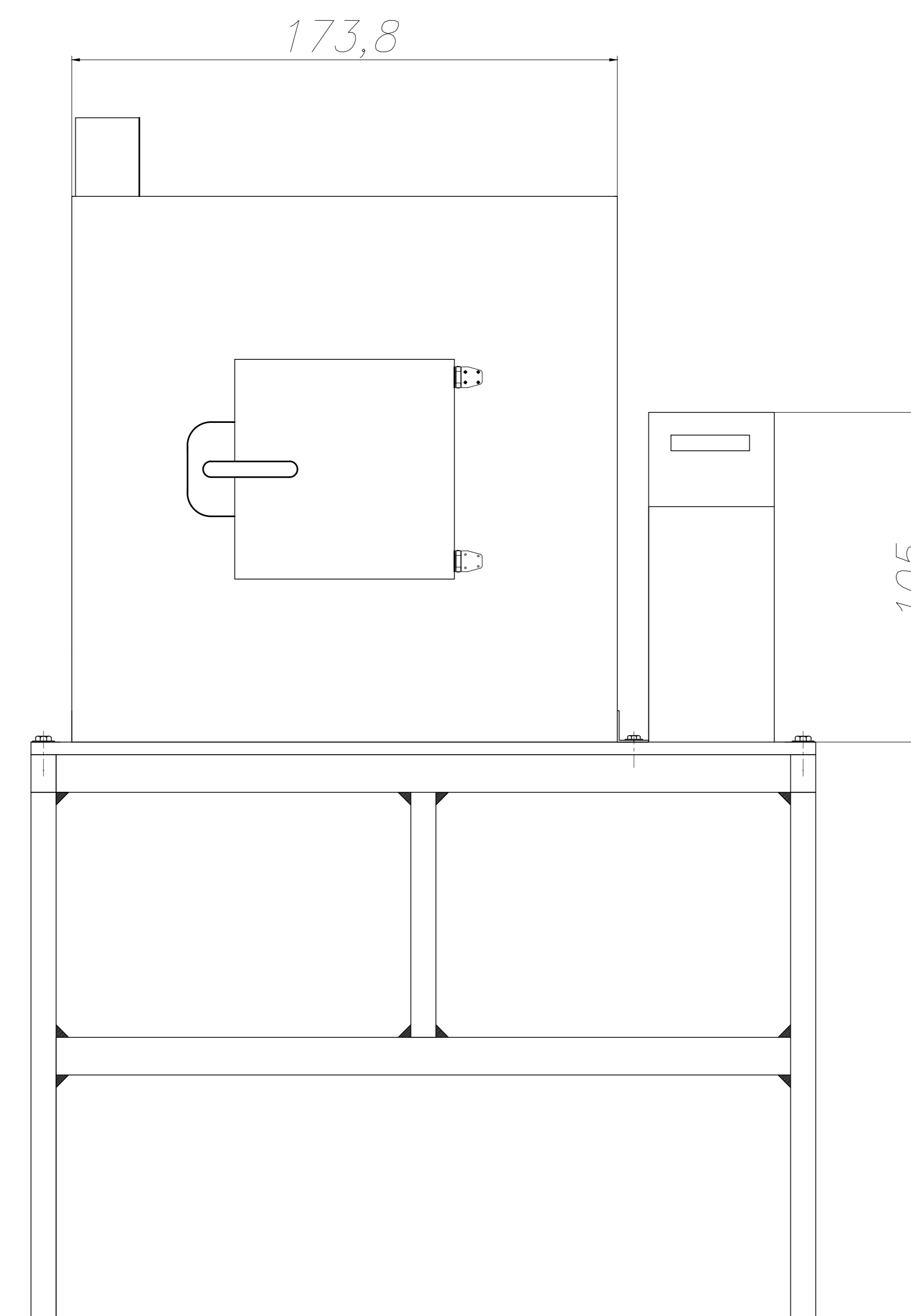
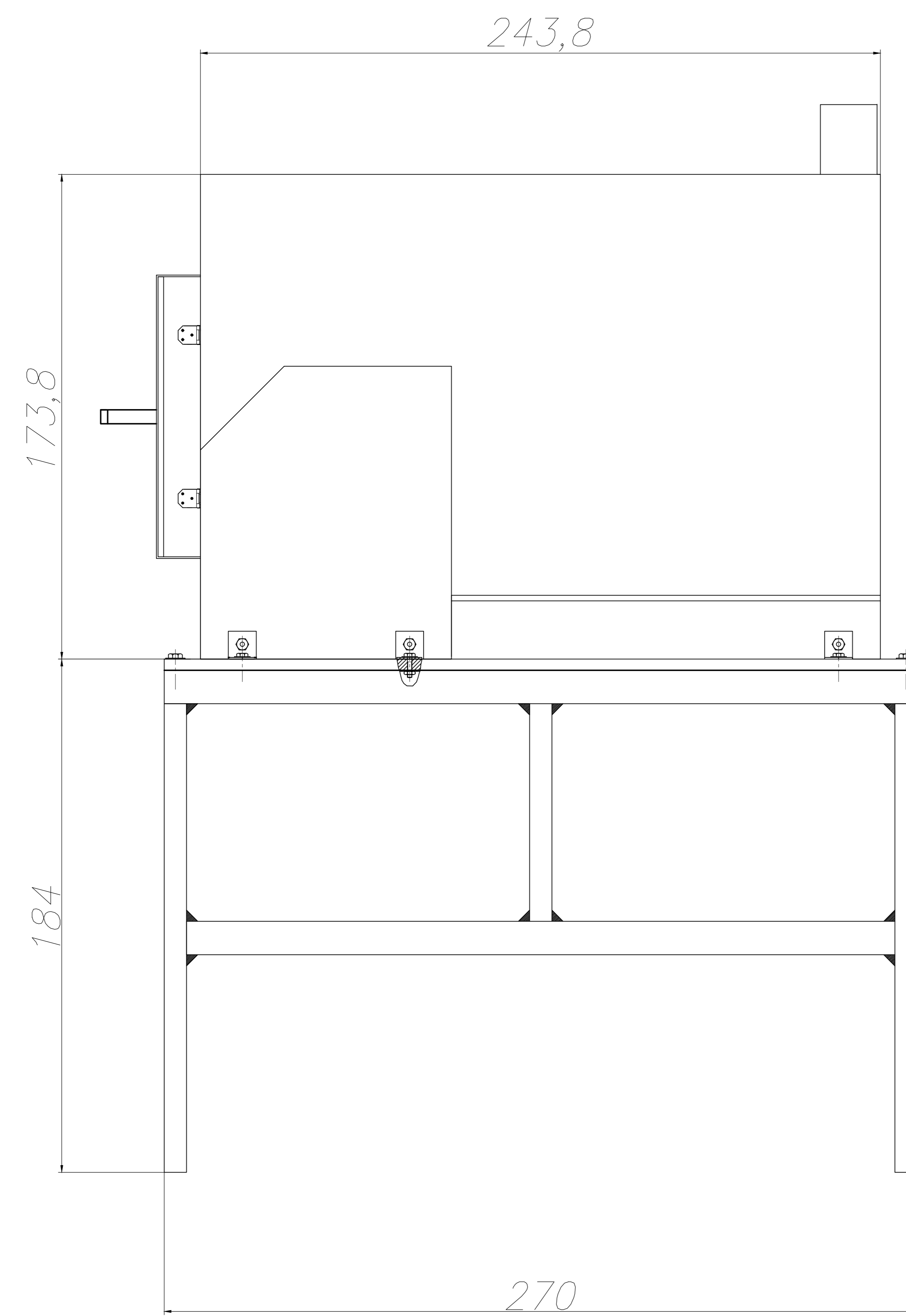
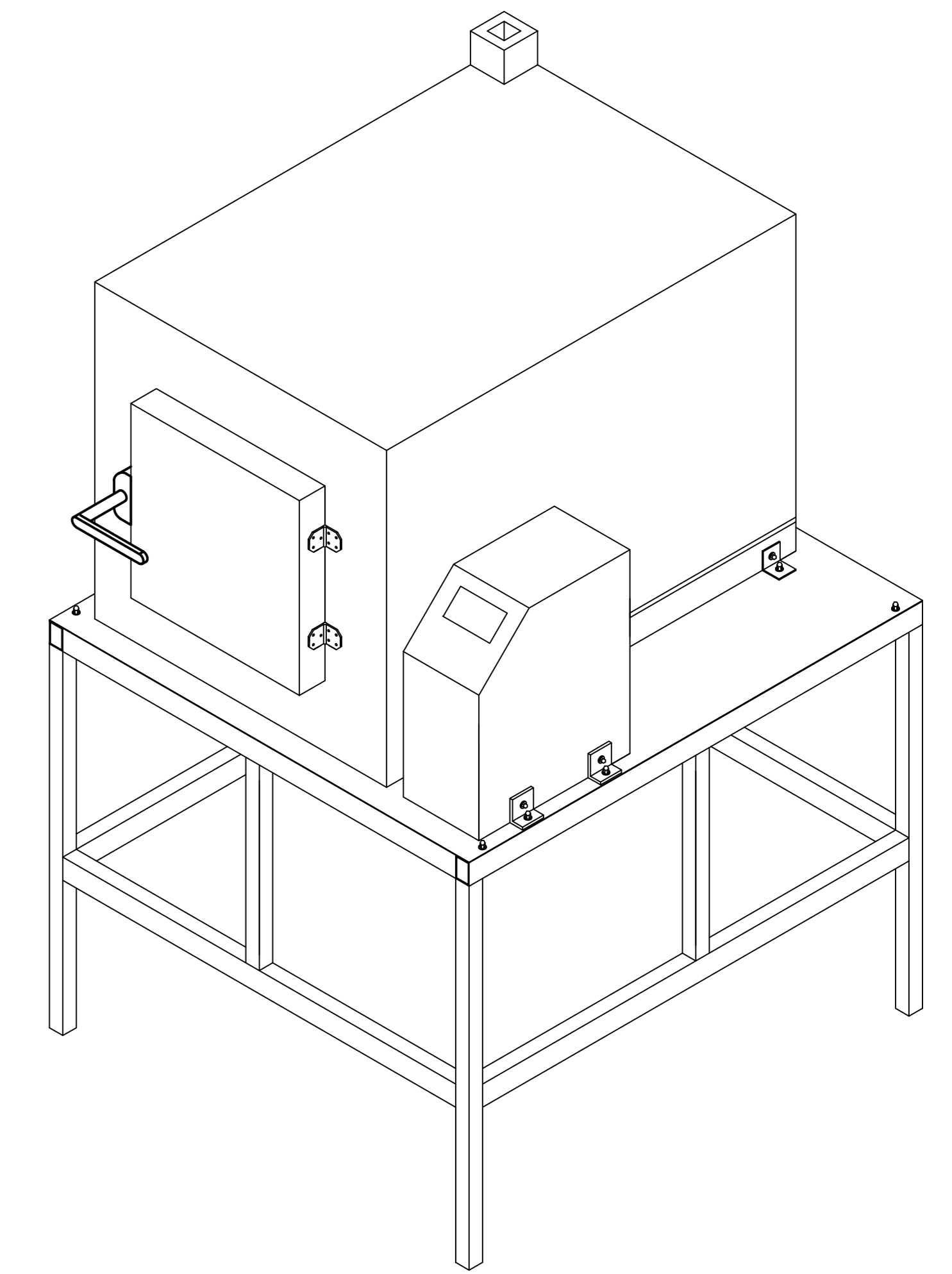
Pos.	Cant.	Denominación	Tolerancia Dim.	Material	Dim. en bruto
8	1	Estructura horno	ISO 2768-m	Acero A36	
7	1	Horno de tratamientos térmicos	ISO 2768-f	Ladrillo Refrac	
6	2	Bisagras	ISO 2768-f	Acero A36	
5	1	Estructura de la puerta	ISO 2768-m	Acero A36	
4	1	Puerta del horno	ISO 2768-f	Acero Inoxidable	
3	1	Cabinete para cuadro eléctrico	ISO 2768-m	Acero A36	
2	1	Mesa de soporte	ISO 2768-m	Acero A36	
1	1	Plancha de soporte	ISO 2768-f	Acero A36	

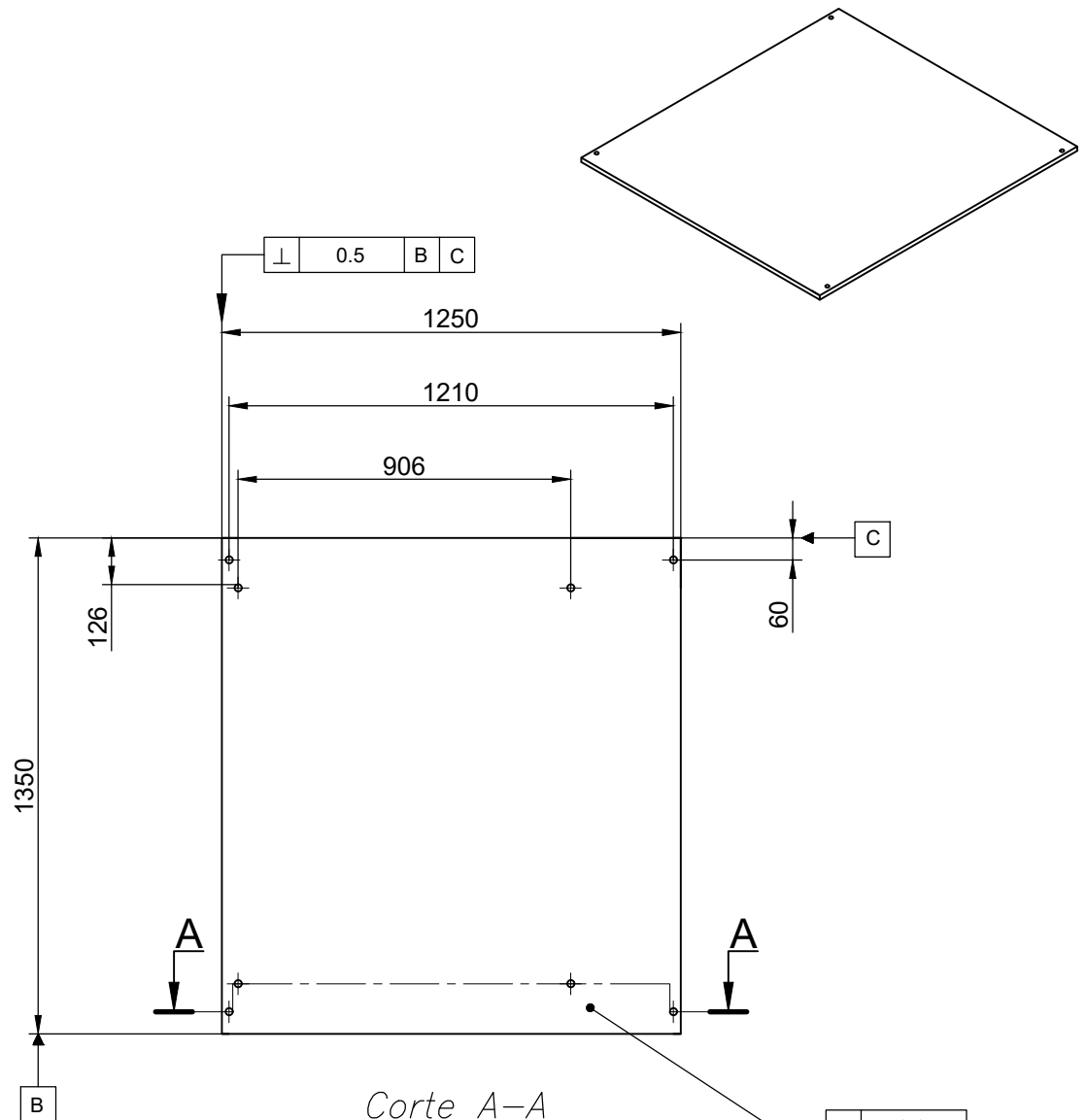
Nombre	Fecha	Mecatrónica
Dibujado Jaramillo, P., Peralta, P.	15/07/22	SEDE
Comprobado Ing. Marco Amaya	15/07/22	MATRIZ CUENCA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

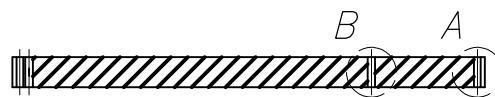
Proyección Escala: 1:0.2 Lámina N° 1



8	1	Estructura horno	ISO 2768-m	Acero A36	
7	1	Horno de tratamientos térmicos	ISO 2768-f	Ladrillo Refrac	
6	2	Bisagras	ISO 2768-f	Acero A36	
5	1	Estructura de la puerta	ISO 2768-m	Acero A36	
4	1	Puerta del horno	ISO 2768-f	Acero Inoxidable	
3	1	Cabinete para cuadro eléctrico	ISO 2768-m	Acero A36	
2	1	Mesa de soporte	ISO 2768-m	Acero A36	
1	1	Plancha de soporte	ISO 2768-f	Acero A36	
Pos.	Cant.	Denominación	Tolerancia Dim.	Material	Dim. en bruto
		Nombre	Fecha	Mecatrónica	
Dibujado	Jaramillo, P. Peralta, P.	15/07/22	SEDE	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	
Comprobado	Ing. Marco Amaya	15/07/22	MATRIZ CUENCA		
Proyección				Escala: 1:0.2	Lámina N° 2
CONJUNTO HORNO TRATAMIENTOS TÉRMICOS					

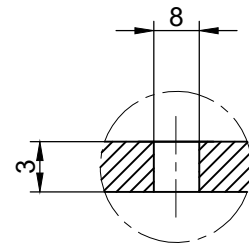
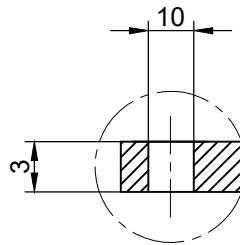


Corte A-A



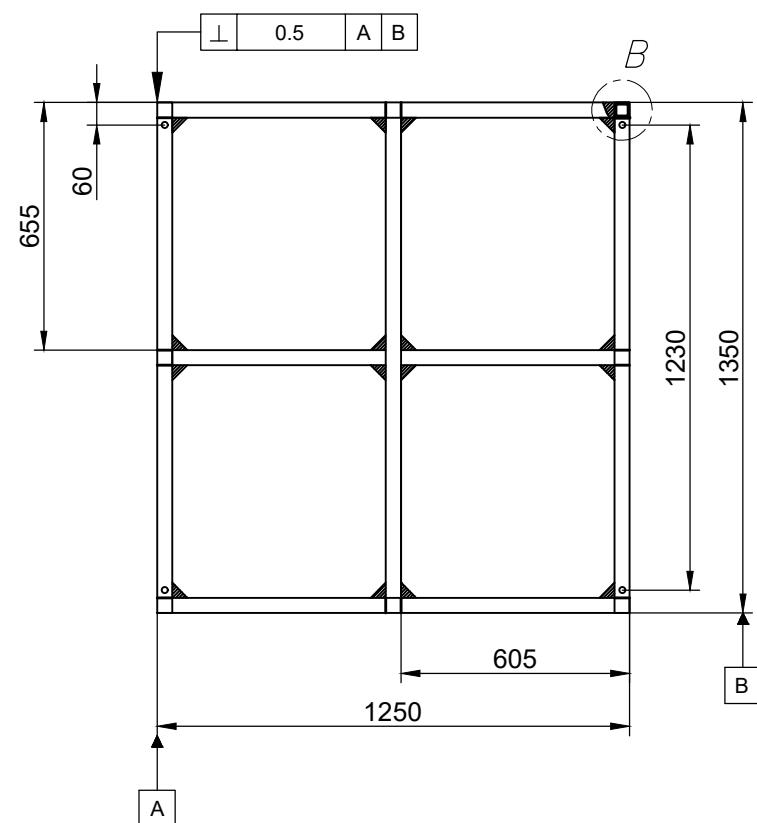
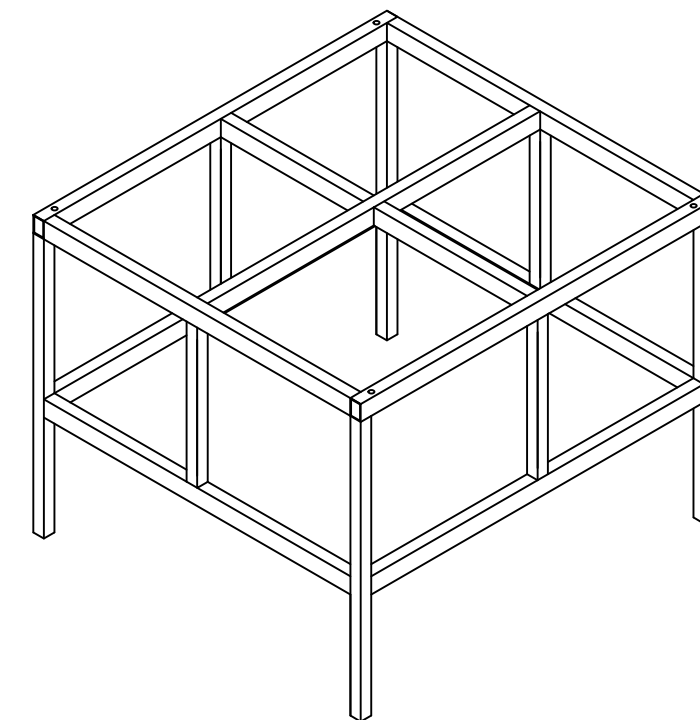
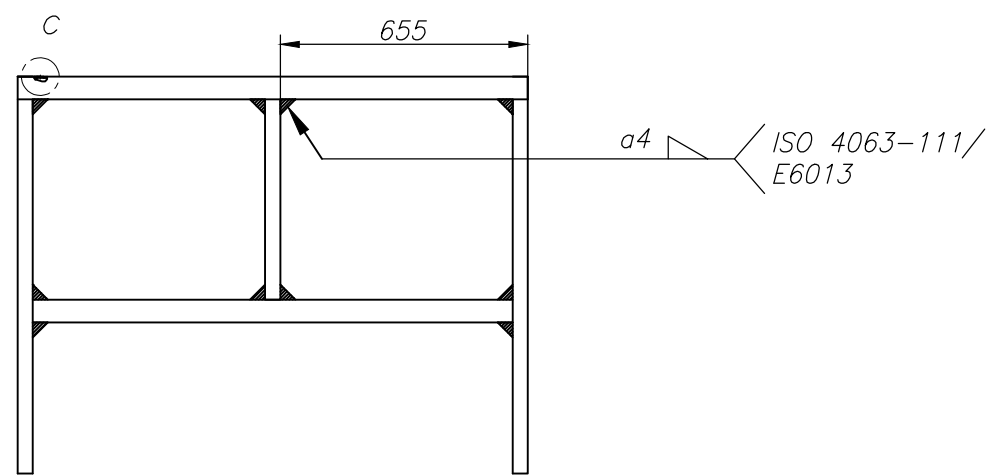
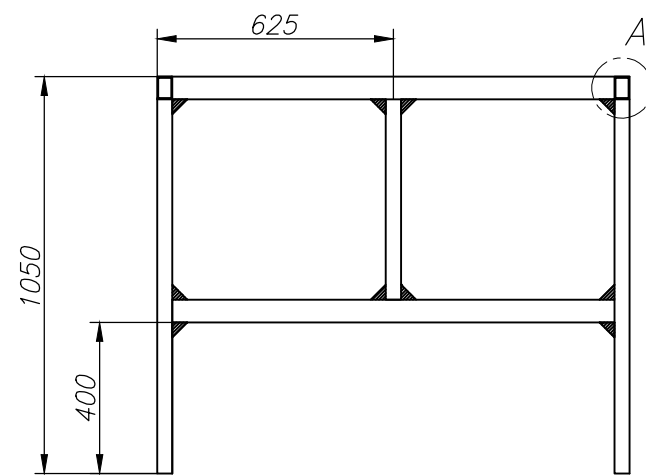
DETALLE A (1:1)

DETALLE B (1:1)

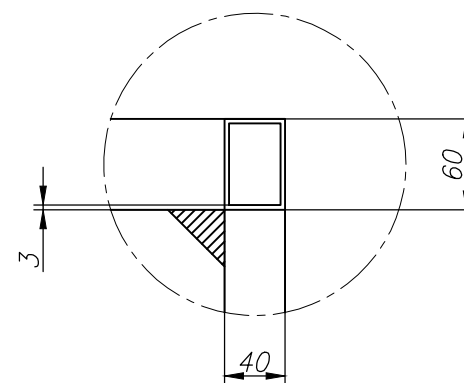


Unidades: mm

1	1	Plancha de soporte	ISO 2768-f	Acero A36	
Pos.	Cant.	Denominación	Tolerancia Dim.	Material	Dim. en bruto
		Nombre	Fecha	<b>UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA</b>	
Dibujado	Jaramillo.P, Peralta.P	15/07/22	Ingeniería Mecatrónica		
Comprobado	Ing. Marco Amaya	15/07/22	SEDE MATRIZ CUENCA		
Proyección	Plancha de soporte				Escala: 1:1
					Lámina N° 3

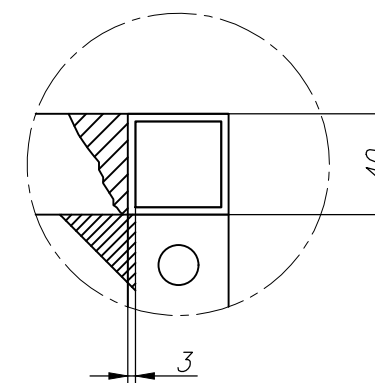


DETALLE A (1:1)



Tubo estructural rectangular 40x60x3 mm

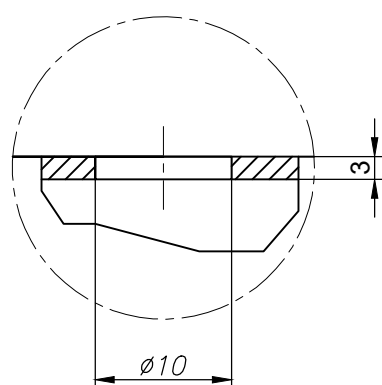
DETALLE B (1:1)



Tubo estructural cuadrado 40x40x3 mm

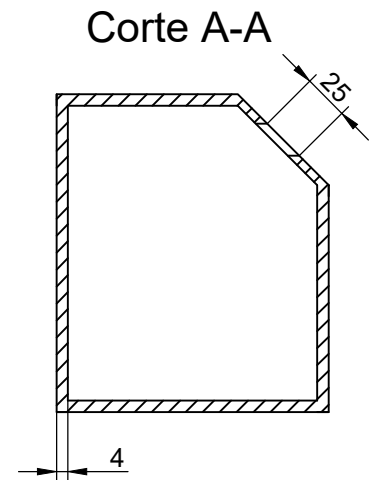
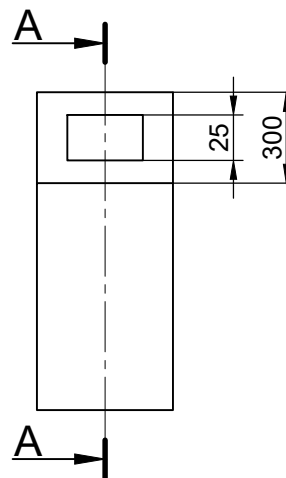
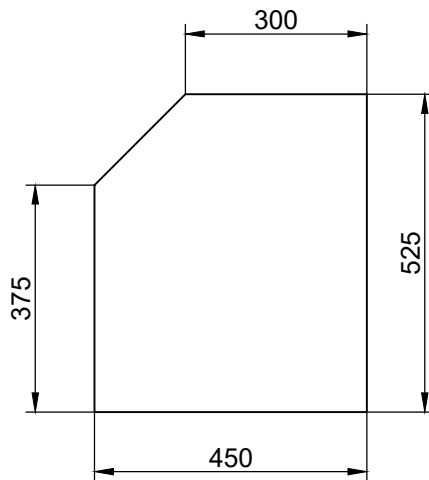
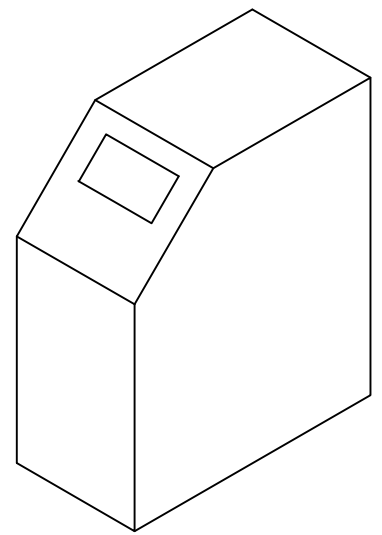
Unidades: mm

DETALLE C (1:1)

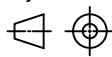


3	1	Mesa de soporte	ISO 2768-m	Acero A36	
Pos.	Cant.	Denominación	Tolerancia Dim.	Material	Dim. en bruto
		Nombre	Fecha	Mecatrónica	
Dibujado	Jaramillo.P, Peralta.P	15/07/22	SEDE MATRIZ CUENCA	 UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA	
Comprobado	Ing. Marco Amaya	15/07/22			
Proyección	Mesa de soporte				Escala: 1:1
					Lámina N° 4

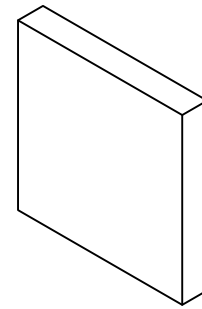
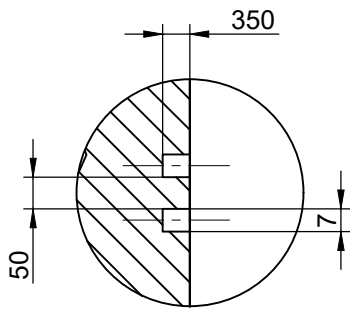




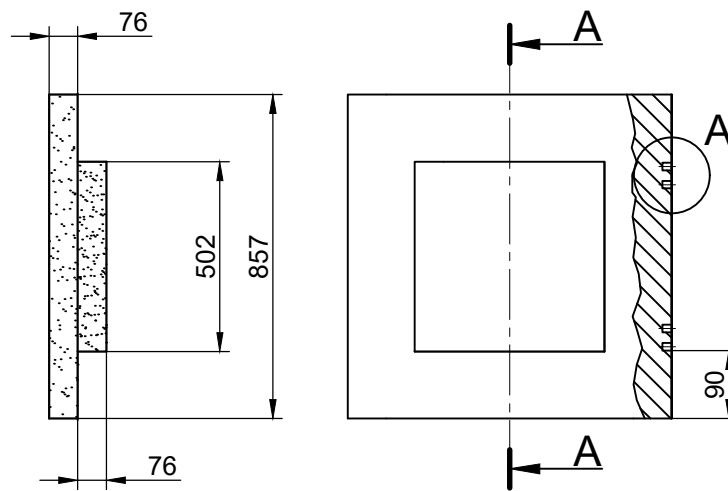
Unidades: mm

4	1	Gabinete para cuadro eléctrico	ISO 2768-m	Acero A36	
Pos.	Cant.	Denominación	Tolerancia Dim.	Material	Dim. en bruto
		Nombre	Fecha	Ingeniería Mecatrónica	
Dibujado	Jaramillo.P, Peralta.P	15/07/22	SEDE MATRIZ CUENCA	 <b>UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA</b>	
Comprobado	Ing. Marco Amaya	15/07/22			
Proyección	Gabinete para cuadro eléctrico				Escala: 1:1
					Lámina N° 5

Detalle A

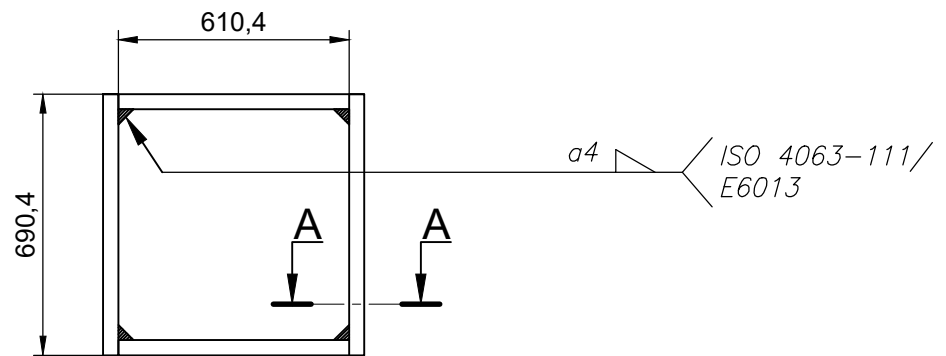
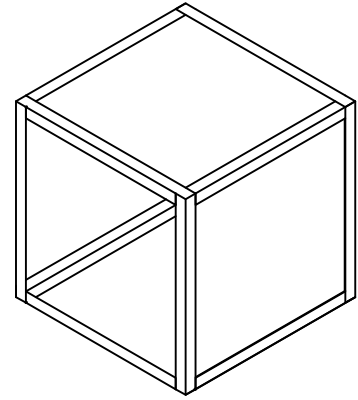


Corte A-A

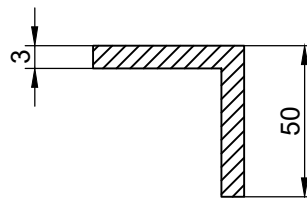


Unidades: mm

5	1	Puerta del horno		ISO 2768-f	Ladrillo Refract.	
Pos.	Cant.	Denominación		Tolerancia Dim.	Material	Dim. en bruto
		Nombre	Fecha	Ingeniería Mecatrónica		
Dibujado	Jaramillo.P, Peralta.P	15/07/22		SEDE MATRIZ CUENCA	UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA	
Comprobado	Ing. Marco Amaya	15/07/22				
Proyección	Puerta del horno					Escala: 1:1
						Lámina N° 6



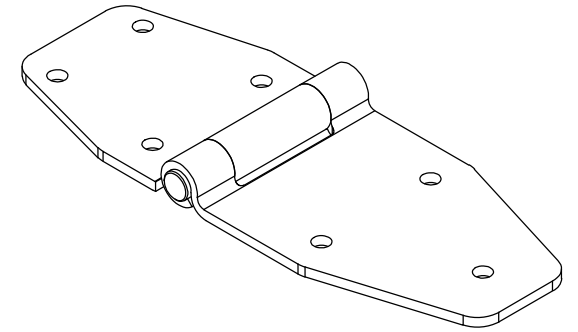
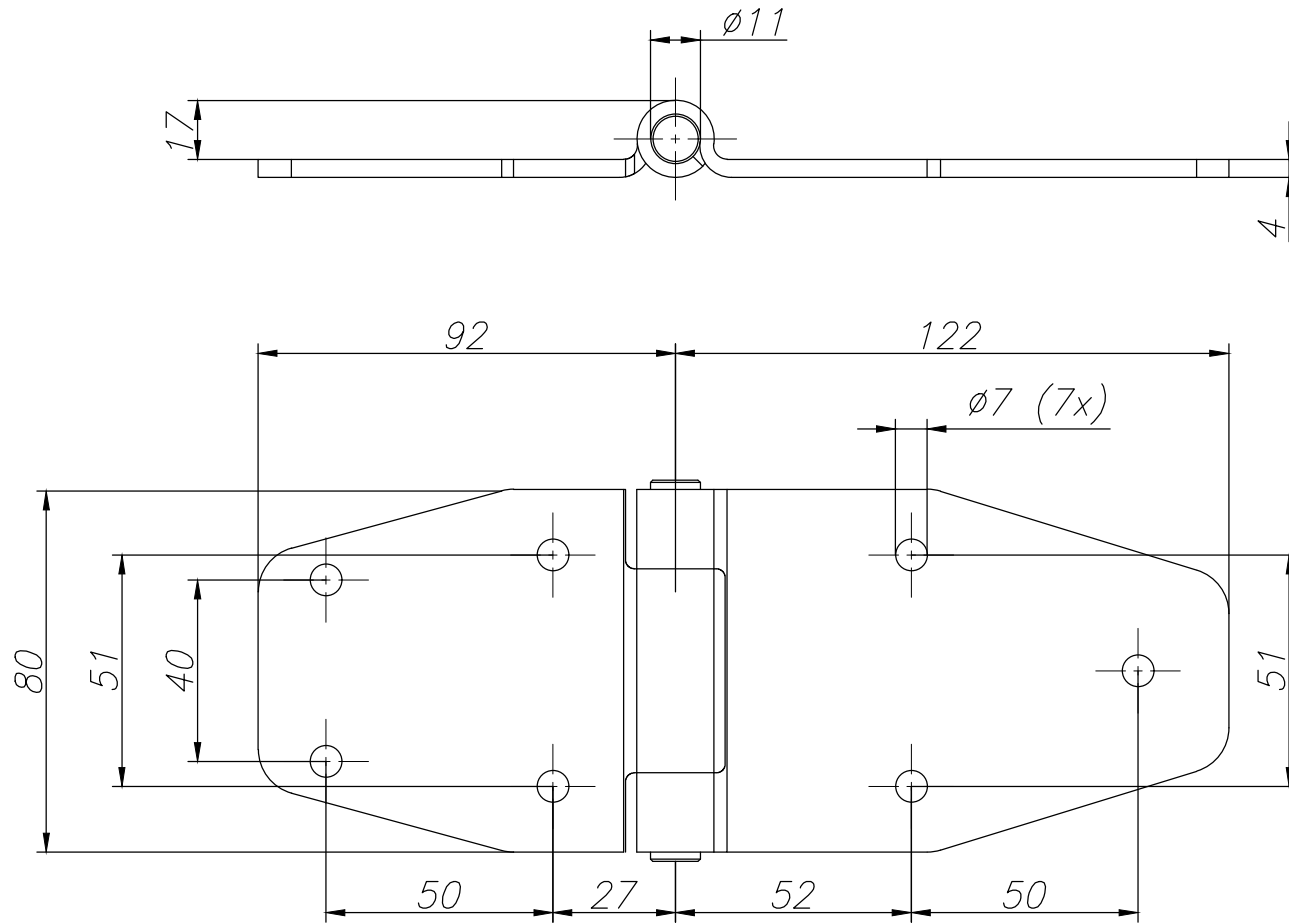
Sección A-A



Perfil estructural 50x3

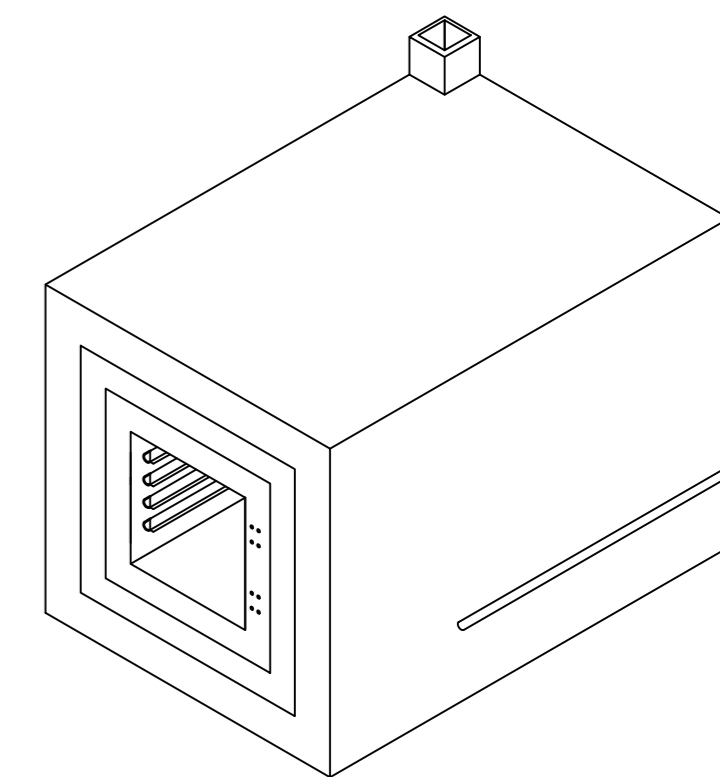
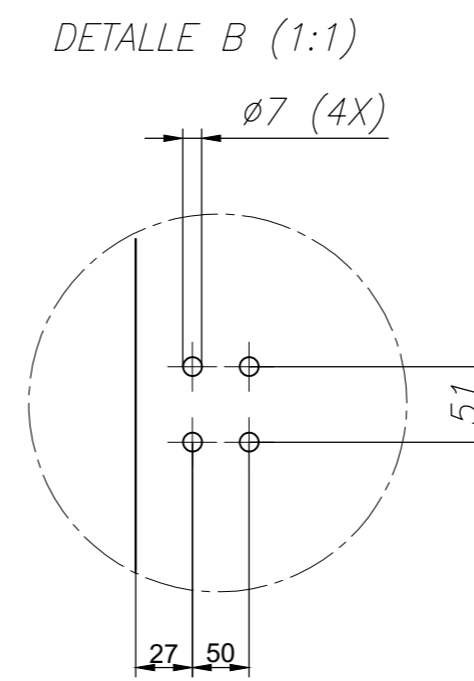
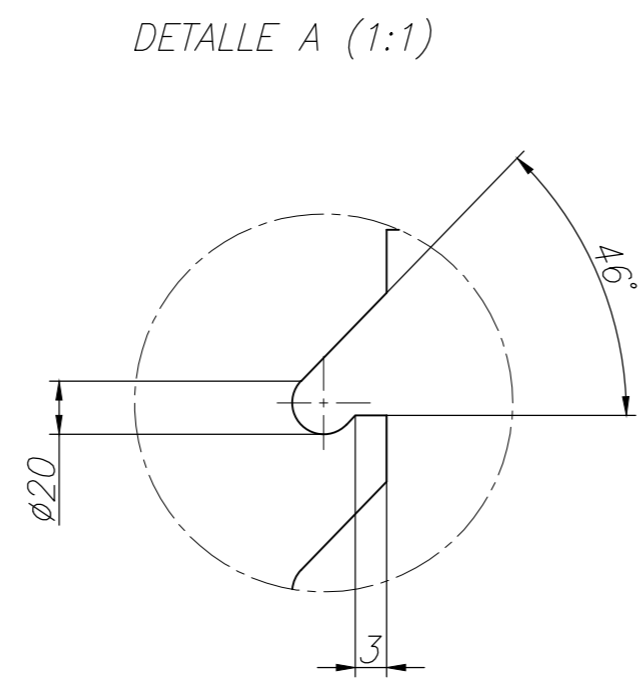
Unidades: mm

6	1	Estructura de la puerta	ISO 2768-m	Acero A36	
Pos.	Cant.	Denominación	Tolerancia Dim.	Material	Dim. en bruto
		Nombre	Fecha	Ingeniería Mecatrónica	<b>UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA</b>
Dibujado	Jaramillo.P, Peralta.P	15/07/22	SEDE	MATRIZ CUENCA	
Comprobado	Ing. Marco Amaya	15/07/22			
Proyección	Estructura de la puerta				Escala: 1:1
					Lámina N° 7

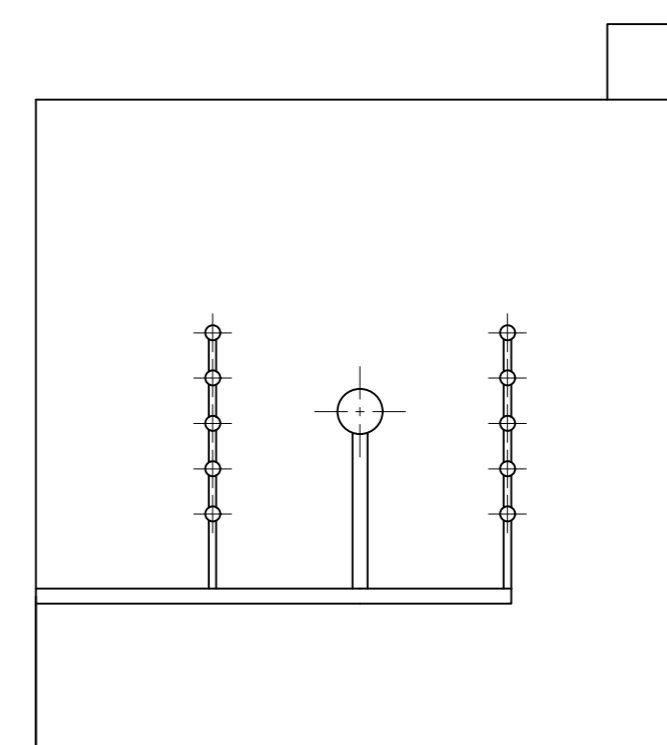
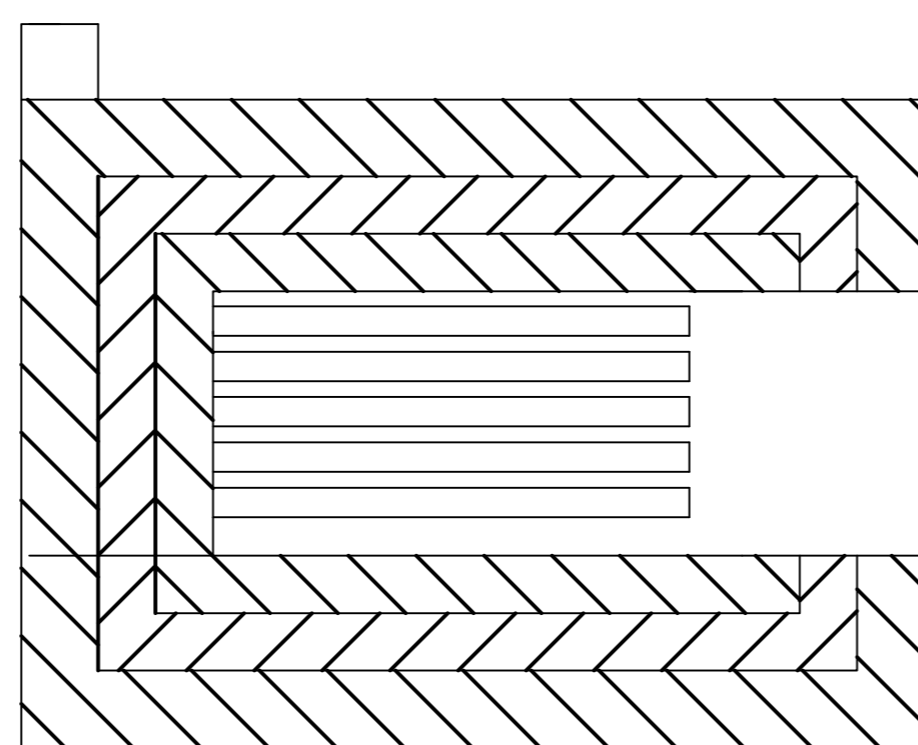
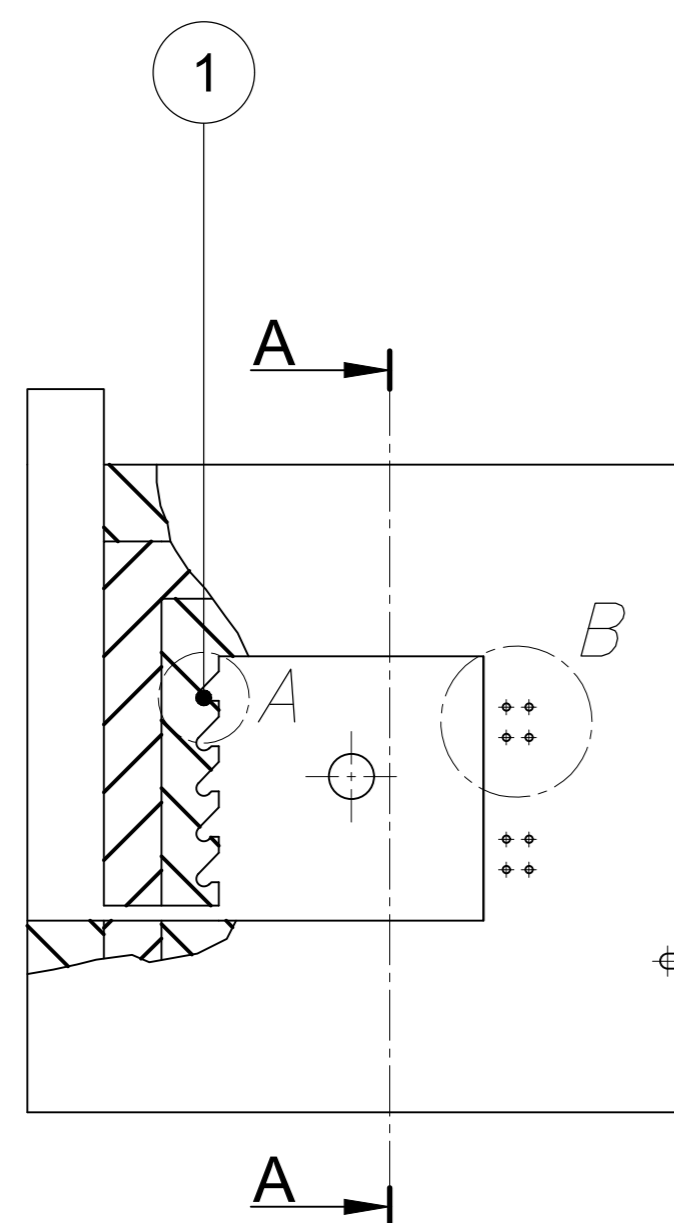


Unidades: mm

8	1	Bisagra		ISO 2768-f	Stainless steel304		
Pos.	Cant.	Denominación		Tolerancia Dim.	Material	Dim. en bruto	
		Nombre	Fecha	Mecatrónica			
Dibujado	Jaramillo.P, Peralta.P	15/07/22		SEDE		UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA	
Comprobado	Ing. Marco Amaya	15/07/22		MATRIZ CUENCA			
Proyección					Bisagra		Escala: 1:1
							Lámina N° 8

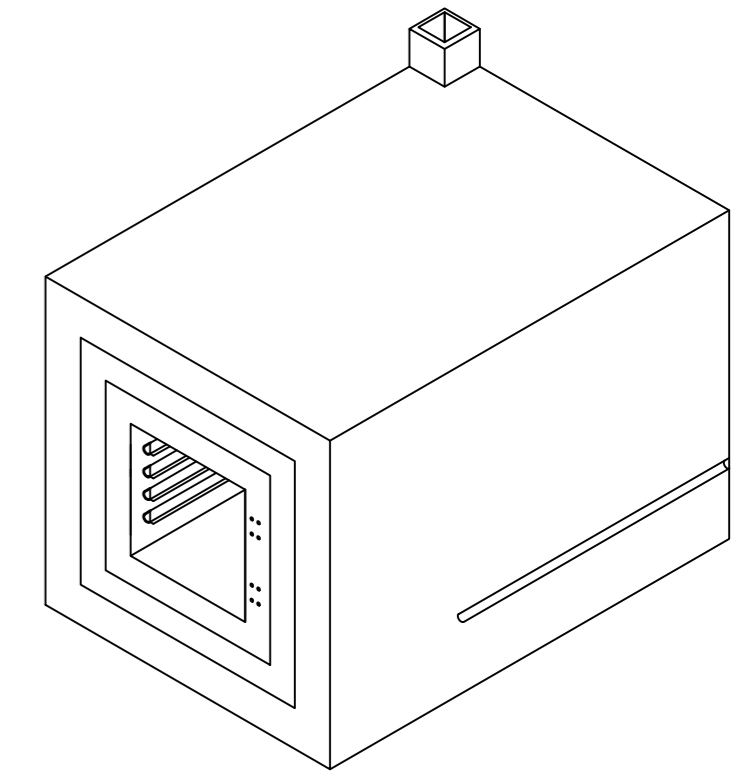


Corte A-A

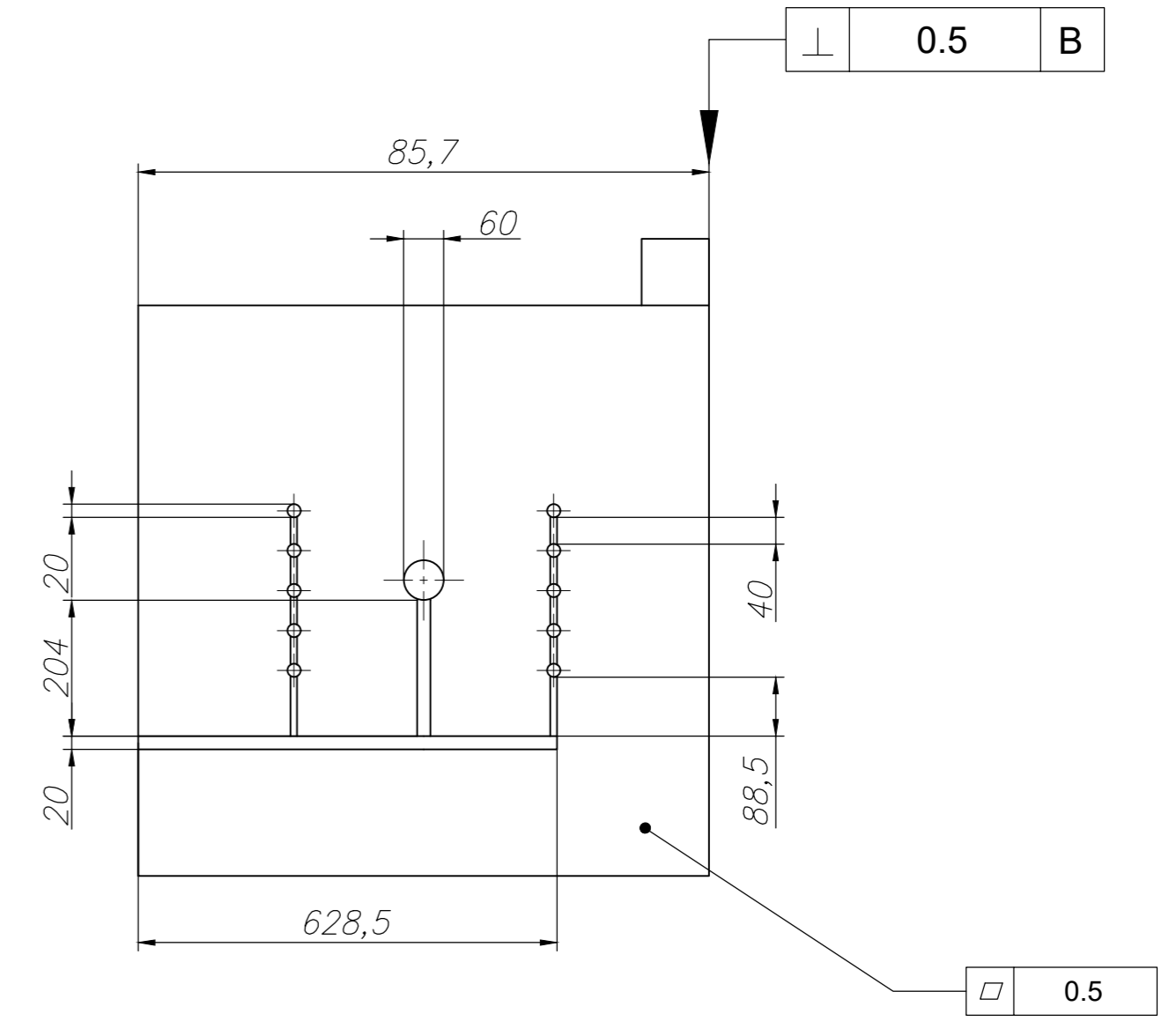
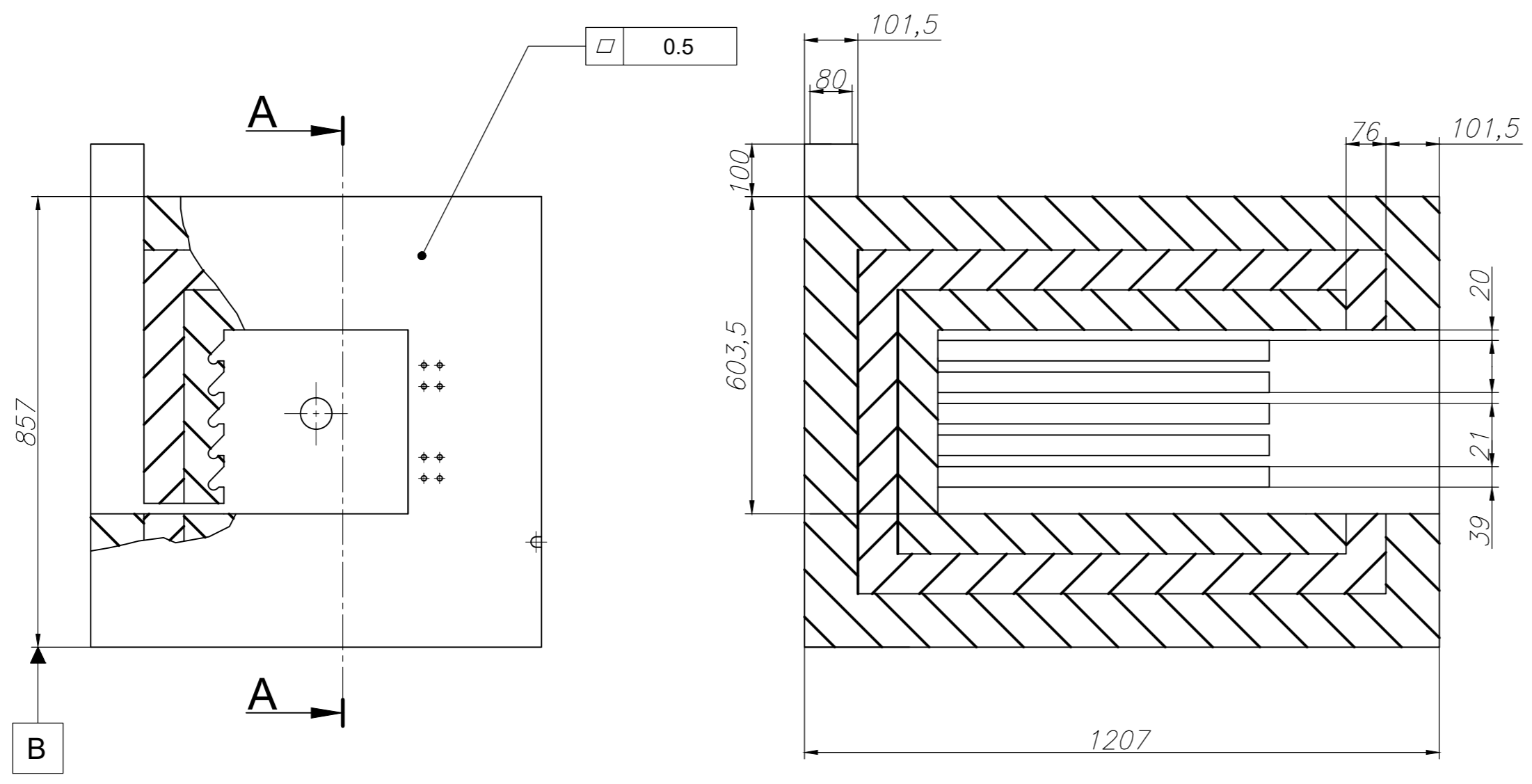


Unidades: mm

1	10	Niquelina	ISO 2768-c	Khantal A1	
Pos.	Cant.	Denominación	Tolerancia Dim.	Material	Dim. en bruto
		Nombre	Fecha	Mecatrónica	
Dibujado	Jaramillo.P, Peralta.P	15/07/22		SEDE	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
Comprobado	Ing. Marco Amaya	15/07/22		MATRIZ CUENCA	
Proyección	Horno de tratamientos térmicos				Escala: 1:1
					Lámina N° 9

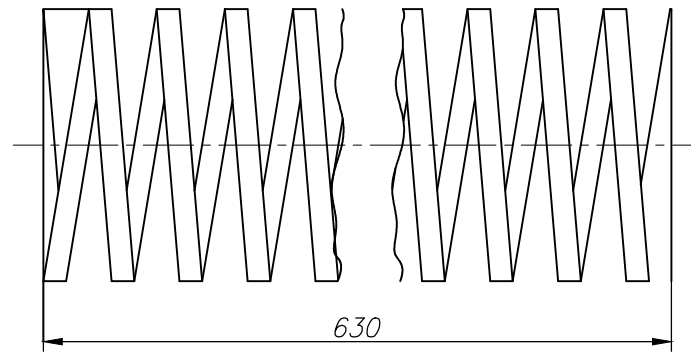
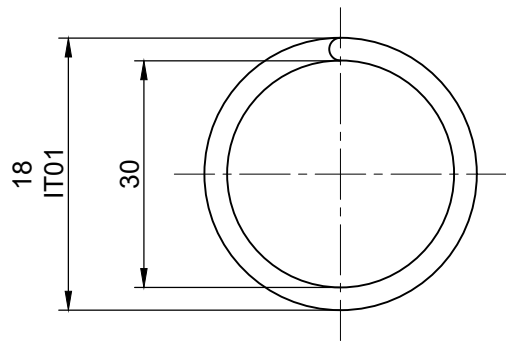


Corte A-A



Unidades: mm

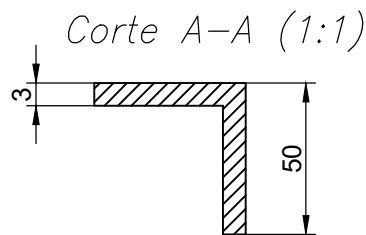
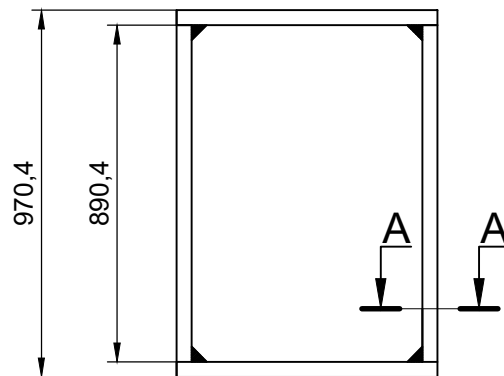
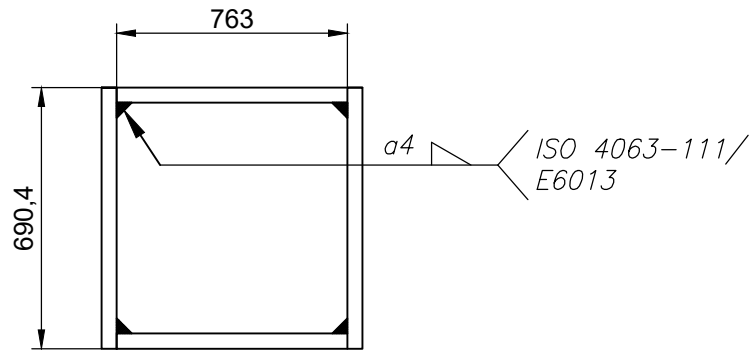
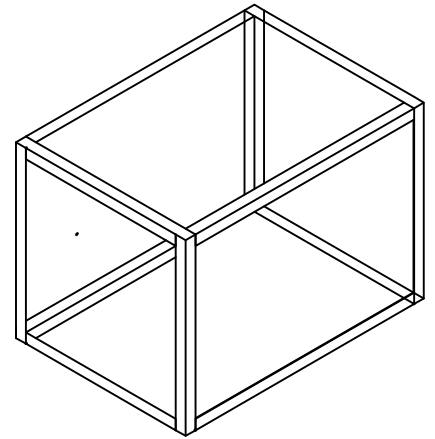
7	1	Horno de tratamientos térmicos		ISO 2768-f	Ladrillo Refract.	
Pos.	Cant.	Denominación		Tolerancia Dim.	Material	Dim. en bruto
		Nombre	Fecha	Mecatrónica	 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	
Dibujado	Jaramillo.P, Peralta.P	15/07/22		SEDE		
Comprobado	Ing. Marco Amaya	15/07/22		MATRIZ CUENCA		
Proyección	Horno de tratamientos térmicos					Escala: 1:1
						Lámina N° 10



<i>Niquelina</i>	
<i>Numero de espiras</i>	<i>376</i>
<i>Paso</i>	<i>12</i>
<i>Longitud</i>	<i>630</i>
<i>Diámetro hilo</i>	<i>3</i>

*Unidades: mm*

8	10	Niquelina		ISO 2768-f	Khantal A1	
Pos.	Cant.	Denominación		Tolerancia Dim.	Material	Dim. en bruto
		Nombre	Fecha	Mecatrónica		
Dibujado	Jaramillo.P, Peralta.P	15/07/22		SEDE		
Comprobado	Ing. Marco Amaya	15/07/22		MATRIZ CUENCA		
Proyección	Niquelina					Escala: 1:1
						Lámina N° 11



Perfil estructural 50x3

Unidades: mm

10	1	Estructura horno	ISO 2768-m	Acero A36	
Pos.	Cant.	Denominación	Tolerancia Dim.	Material	Dim. en bruto
		Nombre	Fecha	<b>UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA</b>	
Dibujado	Jaramillo.P, Peralta.P	15/07/22	Ingeniería Mecatrónica		
Comprobado	Ing. Marco Amaya	15/07/22	SEDE MATRIZ CUENCA		
Proyección	Estructura horno				Escala: 1:1
					Lámina N° 12