UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE

Diseño de horno de fundición y tratamientos térmicos para el laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad Técnica Federico Santa María Campus San Joaquín

Tomás Santa María Rillón

MEMORIA DE TITULACION PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

Profesor Guía: Dr. Ing. Sheila Lascano Farak

Profesor Correferente: Dr. Ing. Ricardo Chávez Vásconez

Julio 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ■ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Diseño de horno de fundición y tratamientos térmicos para el laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad Técnica Federico Santa María Campus San Joaquín

Nombre del candidato(a): Tomás Santa María Rillón

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: San Joaquin **Departamento:** Ingeniería Civil Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Sheila Katherine Lascano Farak, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

■ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

_____

_____

_____

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 17/08/2026 **Firma:** Sheila Katherine Lascano Farak — Firmado digitalmente por Sheila Katherine Lascano Farak Fecha: 2026.08.17 10:22:50 -04'00'

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 11/08/26 **Firma:**

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

Finalizando esta larga pero grata trayectoria estudiantil en la Universidad Técnica Federico Santa María me gustaría agradecer a mis padres que siempre me dieron el apoyo y comprensión necesaria para seguir adelante en los altos y bajos de mi vida universitaria, también quiero agradecer a mis compañeros, Javier, José, Paulina, Natalia, Matías, Martín, Cristobal, Juan Pablo, Diego, Axel y todos los amigos que pude conocer por el basquetbol donde también debo a agradecer a mis entrenadores Felipe Reyes y Jaime Castillo por las oportunidades y enseñanzas que me entregaron.

Además, agradecer a los docentes Dr. Ing. Sheila Lascano y Dr. Ing. Ricardo Chávez por su disposición y enseñanzas durante la elaboración de mi tesis, guiándome y dando su opinión experta para realizar un trabajo de mayor calidad y facilitando el proceso.

Por último, pero no menos importante gracias a mi polola Valentina por siempre estar ahí en lo académico, deportivo y personal.

"Todo lo negativo, la presión, los desafíos son una oportunidad para superarte."

"Diviértete, la vida es muy corta como para quedarse estancado y achicarse. Tienes que seguir adelante. Tienes que avanzar. Pon un pie delante del otro, sonríe y sigue echándole ganas."

-Kobe Bryant.

RESUMEN

En esta tesis de titulación se aborda el desafío de diseñar un horno de fundición a escala de laboratorio para el departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María campus San Joaquín, con el fin de complementar el horno ya existente en dicho departamento, buscando diseñar un horno con mayores capacidades de temperatura y carga de material. El horno diseñado teóricamente será capaz de realizar tratamientos térmicos y fundir metales ferrosos y no ferrosos de manera segura, controlada y acorde a las otras especificaciones del cliente.

Para llevar a cabo dicho diseño, se utilizó una metodología de diseño de ingeniería la cual abarca tres principales etapas: diseño conceptual, diseño estructurado y diseño en detalle.

El diseño conceptual comienza con el análisis de la problemática que justifica este proceso de diseño, declarando las necesidades y requerimientos del cliente, seguidos por el análisis funcional. Además, se realizaron búsquedas de información externas como productos similares, patentes y conceptos relacionados con el fin de tener una correcta visualización de todas las variables a considerar, posteriormente analizando y caracterizando estas mediante una matriz de despliegue de la función de la calidad permitiendo así relacionar los requerimientos del cliente con las características y requerimientos técnicos del diseño.

Una vez que se determinó el concepto que se adecúa de mejor manera a los objetivos y necesidades del diseño, se realizó el diseño estructurado; Donde se definió la arquitectura del horno, seleccionando los materiales, componentes y procesos de manufactura. Todas estas decisiones se realizaron en torno a la etapa anterior y en base a cálculos térmicos, asegurando así que la selección de componentes sea óptima y suficiente.

Por último, en la etapa de diseño en detalle se elaboraron planos de fabricación utilizando Autodesk Inventor Profesional y se calcularon los costos finales.

Finalizadas dichas estepas se diseñó un horno de 36 [L], con una potencia de 5.280 [W], utilizando resistencias de alambre es capaz de alcanzar 1300 °C, con una cámara interna que permite el uso de crisoles con capacidades de carga superiores a 2 [L] a un costo de 2.995.138 CLP, el cual es considerablemente bajo comparado con los productos de esas especificaciones y capacidades en el mercado como el horno de mufla Kintek KT-M14-12L el cual tiene capacidades similares pero con una cámara de 12 [L] y un precio de 3.955.226 CLP.

GLOSARIO

A: Área [m^2]

C_t: Factor de temperatura [-].

d: Diámetro de la resistencia [mm].

D: Diámetro de la bobina [mm].

d_{gap}: Distancia entre placas [mm].

$\epsilon_{i,j}$: Emisividad [-].

η: Eficiencia térmica [-].

h_{comb}: Coeficiente de transferencia de calor por convección y radiación [W/m^2K].

h_{conv}: Coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m^2K].

$h_{convección}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección $W/[m^2K]$.

h_{rad}: Coeficiente de transferencia de calor por radiación [W/m^2K].

I: Corriente [A].

$k_{aire(tconv,n)}$: Conductividad del aire a la temperatura $t_{conv,n}$

K_d: Factor de corrección de diámetro de alambre [-].

l: Longitud de la resistencia [m].

$L_{efectivo}$: Longitud de la bobina sin comprimir [mm].

L_w: Longitud de la bobina cerrada [mm].

P: Potencia [W].

P_s: Carga superficial del elemento calefactor [W/cm^2].

$Q_{pared,i:}$ Pérdida de calor por una pared [W].

$Q_{pérdidas}$: Pérdidas de calor totales del horno [W].

Q_{Suelo}: Pérdida de calor por el suelo [W].

Q_{Tapa}: Pérdida de calor por la tapa/compuerta [W].

Q_{Techo}: Pérdida de calor por el techo [W].

Q_{util}: Calor neto retenido por el horno [W].

R_{20}: Resistencia en frío para elementos calefactores [Ω].

$R_{20/m}$: Resistencia en frío por unidad de metro para elementos calefactores [Ω/m].

R_{comb}: Resistencia térmica combinada (convección + radiación) [K/W].

R_{conv}: Resistencia térmica de convección [K/W].

R_{rad}: Resistencia térmica de radiación [K/W].

$R_{pared,i}$: Resistencia térmica total equivalente para una pared individual [K/W].

R_{Suelo}: Resistencia térmica total equivalente para el suelo del horno [K/W].

R_{Tapa}: Resistencia térmica total equivalente para la "Tapa/Compuerta" del horno [K/W].

R_{Techo}: Resistencia térmica total equivalente para el techo [K/W].

R_T: Resistencia en caliente para elementos calefactores [Ω].

R_{total}: Resistencia térmica equivalente del sistema.

ρ: Resistividad [$\Omega mm^2/m$].

S: Distancia entre espiras [mm].

σ: Constante de Stefan-Boltzmann [W/m^2K^4].

T_{amb}: Temperatura ambiente [K].

U / V: Voltaje [V].

w: Vueltas de la bobina.

W_{Horno}: Potencia del horno [W].

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS 2
RESUMEN 3
GLOSARIO 4
ÍNDICE DE CONTENIDOS 6
INDICE DE FIGURAS 9
INDICE DE TABLA 11
INTRODUCCIÓN 12
OBJETIVOS 13
Objetivo general 13
Objetivos específicos 13
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 14
1. Historia de la Fundición 14
Hornos de fundición 14
Hornos eléctricos 15
Hornos de crisol 18
Crisol Fijo 18
Crisol basculante 18
Crisol móvil 19
Crisoles 19
Materiales refractarios en hornos 21
Materiales de fundición 22
Materiales no Ferrosos 22
Metales Ferrosos 23
Métodos de transferencia de calor 24
Conducción 24
Convección 24
Radiación 25
CAPÍTULO 2. Metodología 25
1.1. Descripción del proceso de diseño 26
Etapa 1: Diseño conceptual 26
Etapa 2: Diseño estructurado 29
Arquitectura del producto 30

Etapa 3: Diseño de detalle....31
CAPÍTULO 3. DISEÑO DE HORNO DE FUNDICIÓN....31
Antecedentes....31
Listado de atributos....33
Objetivos, Funciones y Restricciones....34
Categorización de objetivos del cliente....36
Jerarquización de objetivos con pesos ponderados....37
Análisis funcional....37
1.2. Modelo de caja negra....37
Árbol de funciones....38
Modelo de caja trasparente....39
Benchmarking externo....39
Listado de requerimientos técnicos....41
Matriz de objetivos y métricas....42
Despliegue de la función de la calidad....43
Resolución de contradicciones de los requerimientos....44
Generación de conceptos....45
Búsqueda externa....45
Lluvia de ideas....48
Carta morfológica....49
Generación de conceptos....51
Selección de conceptos....57
Método de selección de pesos ponderados....58
CAPÍTULO 4. DISEÑO DE CONFIGURACIÓN....59
Arquitectura del diseño....59
Definición de la arquitectura....59
Diseño de configuración....62
Criterios de selección y diseño....62
Componentes normalizados adquiridos....67
Diseño paramétrico....68
CAPÍTULO 5. DISEÑO DE DETALLE....91
Selección de componentes normalizados....91
Diseño final....95

CAPITULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN 97
Comparación de parámetros técnicos y costos 97
CAPITULO 7. CONCLUSIONES 99
ANEXOS 100
REFERENCIAS..... 113

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Hornos de fundición [2] 15
Figura 2. Horno de crisol a gas [6] [7] 18
Figura 3. Horno de crisol fijo [3] 18
Figura 4. Horno basculante Nabertherm [7] 19
Figura 5. Horno de crisol móvil [3] 19
Figura 6. (a) Crisol de Alúmina; (b) Crisol de Grafito; (c) Crisol de Sílice 21
Figura 7. (a) Conducción; (b) Convección; (c) Radiación [14] 25
Figura 8. Morfología del diseño [15] 26
Figura 9. Composición de la Casa de la Calidad 27
Figura 10. Arquitectura del diseño modular [15] 31
Figura 11. Horno basculante UTFSM 32
Figura 12. Prototipo de rin MEC160 33
Figura 13. Modelo de caja negra 38
Figura 14. Árbol de funciones 39
Figura 15. Modelo de caja transparente 39
Figura 16. Matriz de objetivos y métricas 42
Figura 17. Matriz QFD 43
Figura 18. Lluvia de ideas 48
Figura 19. Concepto 1 Interfaz-PLC 51
Figura 20. Concepto de horno compuerta frontal 52
Figura 21. Concepto 2 Controlador digital programable 53
Figura 22. Concepto de horno compuerta superior 53
Figura 23. Concepto 3 controlador On/Off 54
Figura 24. Horno conceptual cilíndrico 54
Figura 25. Opción 4 Microcontrolador 55
Figura 26. Horno conceptual de guillotina 56
Figura 27. Concepto N°1 de aislación 56
Figura 28. Concepto N°2 de aislación 57
Figura 29. Concepto N°3 configuración de aislación 57
Figura 30. Arquitectura y módulos 61
Figura 31. Distribución de la Arquitectura 62
Figura 32. Crisol de Carburo de Silicio Corona Cadinhos [22] 67
Figura 33. Controlador térmico programable veto 67
Figura 34 Stock de ladrillos refractarios Anker 30 68
Figura 35. Ladrillo refractario K-26 [23] 68
Figura 36. Carga superficial v/s temperatura del horno [24] 69
Figura 37. Tipos de elementos ensayados [24] 70
Figura 38. Comparación de vida útil de resistencias respecto a las Kanthal A-1 [25] 72
Figura 39. Comparativa de elongación de resistencias APM y A-1 [25] 74
Figura 40. Comparativa de pandeo entre Kanthal APM y A-1 [25] 75
Figura 41. Transferencia de calor en pared aislante red de resistencias 78

Figura 42. Nodos de temperaturas en paredes aislantes laterales 81
Figura 43. Nodos de temperatura techo (sin tapa) 84
Figura 44. Nodos de temperatura tapa superior 86
Figura 45. Nodos de temperaturas en la base 88
Figura 46. Diagrama de cuerpo libre barra, compuerta y armazón 89
Figura 47. Vista explosionada Horno 95
Figura 48. Horno cerrado 96
Figura 49. Horno abierto vista isométrica 96
Figura 50. Horno abierto vista superior 97
Figura 51. Ficha técnica crisol [22] 101
Figura 52. Propiedades Resistencias Kanthal A-1 I [31] 102
Figura 53. Propiedades resistencias Kanthal A-1 II [31] 103
Figura 54. Propiedades resistencias Kanthal A-1 III [31] 104
Figura 55. Propiedades resistencias Kanthal APM I [32] 105
Figura 56. Propiedades resistencias Kanthal APM II [32] 106
Figura 57. Propiedades resistencias Kanthal APM III [32] 107
Figura 58. Catalogo de resistencias Kanthal A-1 y APM [25] 108
Figura 59. Ficha técnica ladrillos K- [23] 109
Figura 60. Ficha técnica Controlador de Temperatura Veto [21] 110
Figura 61. Ficha térmica cable tipo S 111
Figura 62. Ficha técnica termocupla tipo S 112

INDICE DE TABLA

Tabla 1. Tipos de energías, hornos de fundición y sus aplicaciones [3] 15
Tabla 2. Comparación funcional de hornos eléctricos [2] [4] [5] 15
Tabla 3. Características de los principales materiales de crisol [9] 20
Tabla 4. Composición de materiales refractarios [10] 21
Tabla 5. Propiedades del aluminio [12] 23
Tabla 6. Lista de objetivos con pesos ponderados 37
Tabla 7. Benchmarking externo de competidores 40
Tabla 8. Tabla de contradicciones TRIZ 44
Tabla 9. Búsqueda externa de patentes 45
Tabla 10. Carta morfológica 49
Tabla 11. Selección de conceptos 58
Tabla 12. Módulos y subfunciones 60
Tabla 13. Tabla comparativa de Termocuplas 63
Tabla 14. Preselección de aislantes y refractarios 63
Tabla 15. Materiales estructurales propuestos 65
Tabla 16. Especificaciones de Crisol de Carburo Silicio Corona Cadinhos [22] 67
Tabla 17. Especificaciones técnicas de configuración Kanthal elementos de hilo [25] 71
Tabla 18. Especificaciones técnicas de configuraciones Kanthal elementos de tiras [25] 72
Tabla 19. Comparación NIÑROTHAL V/S Kanthal [25] 73
Tabla 20. Temperaturas máximas permisibles [25] 73
Tabla 21. Temperaturas nodales paredes aislantes laterales 82
Tabla 22. Nodos de temperatura techo 84
Tabla 23. Nodos de temperatura tapa superior 86
Tabla 24. Temperaturas nodales de la base 88
Tabla 25. Pérdidas de calor 88
Tabla 26. Lista de componentes normalizados 91
Tabla 27. Comparación Diseño V/S Producto externo 97
Tabla 28. Variables de cálculo térmico [14] [26] [27] [28] [29] [30] 100

INTRODUCCIÓN

La fundición es un proceso altamente utilizado en la industria de la manufactura, siendo este ocupado en una gran variedad de procesos de fabricación como lo son la fabricación de engranajes, motores de combustión, baldes de maquinaria pesada, rines de automóvil y más.

Por esto, la fundición es un proceso clave en las enseñanzas del cliente (Universidad Técnica Federico Santa María) en el curso de procesos de manufactura y otros cursos afines. Actualmente el Departamento de Ingeniería Mecánica cuenta con un horno basculante de resistencias eléctricas con un crisol de capacidad de 750 ml y una temperatura máxima de operación cercana a los 1100°C. Dichas capacidades implican limitaciones respecto al tipo de materiales que se pueden trabajar, dificultando trabajar materiales ferrosos, no ferrosos y aleaciones que tengan un punto de fusión mayor y necesiten temperaturas de operación superior a los 1100°C, limitando tanto a los docentes e investigadores. Además, dicha capacidad de fundición de 750 ml implica un proceso poco eficiente para la demanda generada por los alumnos e investigadores por lo que el producto a diseñar requiere de un aumento de capacidad en lo que respecta al crisol.

Por otro lado, al ser el único equipo de fundición disponible en los campus UTFSM de Santiago al presentarse una avería en dicho equipo todas las actividades docentes y de investigación se ven perjudicadas. Debido a esas razones se estima necesario el diseño de un nuevo horno de fundición que permita aumentar las opciones de proyectos de fundición ajustándose de manera personalizada a las necesidades del cliente, permitiendo así una operación continua de fundición ya sea con el horno actual como repuesto o en paralelo en el caso de que se genere una mayor demanda productiva.

Esta memoria de titulación busca generar un diseño con el cual sea posible fabricar dicho producto en las instalaciones de la UTFSM campus San Joaquín. Para esto se utilizan tres principales fases de diseño, las cuales son: diseño conceptual, diseño estructurado y diseño en detalle. Las cuales son complementadas con software de modelamiento CAD como lo es Autodesk Inventor para generar modelo 3D y planos de fabricación.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Diseñar un horno de fundición con capacidad de fundir aluminio, realizar tratamientos térmicos y carga de 2 litros de material.

Objetivos específicos

- Definir los requerimientos y parámetros de operación del horno.
- Generar conceptos basados en búsquedas internas y externas.
- Seleccionar componentes del sistema considerando los requerimientos funcionales.
- Generar un diseño detallado y planos para la fabricación utilizando software de diseño CAD.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1. Historia de la Fundición

La fundición de metales se remonta a la Edad de Bronce, cuando los humanos comenzaron a crear herramientas con metales en lugar de piedra. Con el paso de los años, se ha convertido en una compleja técnica de metalurgia con numerosas aplicaciones [1], como en industria automotriz, maquinaria pesada, de manejo de fluidos, aeroespacial, de generación de energía, ferroviaria y más. Dichas aplicaciones y procesos de fundición permitieron la fabricación de componentes y equipos como válvulas, carcasas, bloques de motor, zapatas de orugas, pasadores, ejes, láminas de acero, engranajes, coronas dentadas impulsores, carcasas de voluta, etc. Los elementos mencionados son utilizados con frecuencia en las distintas industrias, en las cuales los ingenieros civil mecánicos se ven involucrados con frecuencia, convirtiendo a la fundición en un conocimiento necesario para los futuros profesionales con el perfil y competencias de la UTFSM.

Hornos de fundición

Dentro de la fundición existen 2 principales grupos de hornos, los cuales se clasifican según el tipo de obtención de energía ocupada para la fundición de los distintos metales. Siendo estos los hornos eléctricos a combustión como se muestra en la Figura 1 y detalla en la

Tabla *1*.

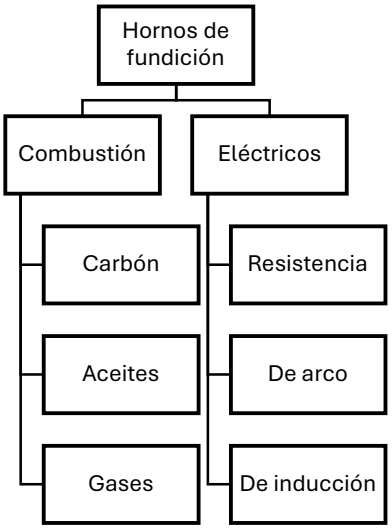


Figura 1. Hornos de fundición [2]

Tabla 1. Tipos de energías, hornos de fundición y sus aplicaciones [3]

Tipo de Energía	Fuente de energía	Forma de la fuente de energía	Aleaciones	Horno
Combustión	**Carbón**	Bituminoso en polvo	Fierros Fundidos	Llama directa
		Antracita	Fierro Fundido	Cubilote
	Coque	Tamaño medio	Fierros Fundidos No Ferrosos	Cubilote Horno de Crisol
	Petróleo	Diesel o Residual Diesel o Residual	No ferrosos Hierro, Acero	Horno de Crisol Horno de Hogar Abierto
	Gas	Gas licuado de Petróleo o Gas Natural Licuado Gas licuado de Petróleo o Gas Natural Licuado	No ferrosos Hierro, Acero	Horno de Crisol Horno de Hogar Abierto
Eléctricos	**Electricidad**	Arco Directo	Acero, Fierros Fundidos	Horno de Arco eléctrico de una, dos o tres fases
		Arco Indirecto	No Ferrosos, Fierros Fundidos	Horno de arco Indirecto
		Resistencia	No Ferrosos	Horno de resistencia central irradiante
		Inducción	Todos los metales	Horno de Inducción Basculante

Hornos eléctricos

Los hornos eléctricos corresponden a sistemas que utilizan energía eléctrica como fuente de calor, lo cual ofrece múltiples ventajas como lo es la capacidad de un control preciso de temperatura, funcionamiento limpio y eficaz, tasas de calentamiento reguladas (velocidad baja, media o alta). Como se observa en la Figura 1 existen 3 tipos: de resistencia, de arco y de inducción. Las características de estos tres se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Comparación funcional de hornos eléctricos [2] [4] [5]

Horno eléctrico	Principio de funcionamiento	Ventajas	Limitaciones
Resistencia	Generación de calor por Efecto Joule (P =	Control preciso de la temperatura,	Están limitados por el punto de fusión y la resistencia a

	I^2*R) al hacer circular corriente por elementos de alta resistividad.	procesos de calentamiento limpios, alcanza altas temperaturas (1450°C) y ofrece una distribución uniforme del calor	la oxidación del material del elemento resistivo. La transferencia de calor (principalmente por radiación y convección) es más lenta en comparación con la generación interna de calor de la inducción o la intensidad del arco eléctrico.
Inducción (Frecuencia de red)	Una corriente alterna de alta frecuencia pasa por una bobina, creando un campo magnético que induce corrientes dentro de la carga de metal para gener8ar calor.	Calor controlado de manera eficiente y uniforme. Gran versatilidad de aplicación (refinerías, siderurgia, minería, sector automotriz, I+D).	No pueden arrancar eficientemente con chatarra pequeña suelta. Generalmente requieren un remanente de metal líquido de la colada anterior o un bloque de arranque sólido y denso para cerrar el circuito magnético.
Inducción sin núcleo	Calentamiento por inducción electromagnética en un crisol que carece de un núcleo central en su diseño.	Gran flexibilidad en el tamaño y composición de la carga, alta eficiencia y excelente control de la temperatura.	Requieren una inversión inicial significativamente mayor debido a los complejos sistemas de inversores de frecuencia, condensadores y sistemas de enfriamiento continuo de agua purificada.
Arco indirecto (AC EAF)	Utiliza corriente alterna para formar un arco eléctrico entre	Alta flexibilidad, funde casi cualquier tipo de	Requiere un mayor número de electrodos, suele ser más ruidoso y menos eficiente

	los electrodos y la carga de metal.	chatarra, encendido y apagado rápido. Ideal para fabricación a pequeña y mediana escala.	energéticamente que el sistema de corriente continua.
Arco directo (DC EAF)	Utiliza corriente continua para generar el arco, empleando normalmente un solo electrodo de grafito.	Mayor vida útil del electrodo (ahorro de costos), proporciona un arco más estable, es más silencioso y ofrece mayor eficiencia energética.	Estructura complicada y presenta un mayor costo inicial de instalación.
Arco sumergido (SAF)	Los electrodos se sumergen directamente en el baño de metal fundido, generando el arco bajo la superficie.	Evita la pérdida excesiva de calor y permite alcanzar altas temperaturas para una producción eficiente de aleaciones con propiedades específicas.	Su aplicación es especializada y se limita al procesamiento de minerales (como manganeso o cromo) para producir ferroaleaciones.

Debido a los requisitos del proyecto fue necesario abordar los tipos de configuraciones de los hornos que utilizan crisoles.

Hornos de crisol

Los hornos de crisol corresponden a los hornos utilizados en los procesos de fundición que usan un elemento llamado crisol el cual sirve para contener el metal, este elemento se caracteriza por sus propiedades refractarias y capacidades de soportar altas temperaturas sin deformarse ni reaccionar con el material que contiene.

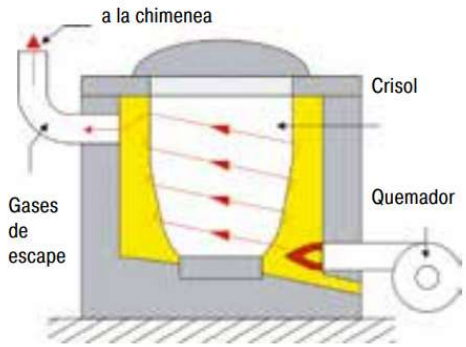


Figura 2. Horno de crisol a gas [6] [7]

Estos pueden ser de tres tipos, crisol fijo, crisol basculante y crisol móvil.

Crisol Fijo

En este tipo de hornos el crisol esta adentro del horno de forma permanente, por lo que es necesario utilizar alguna herramienta externa para extraer el material fundido.

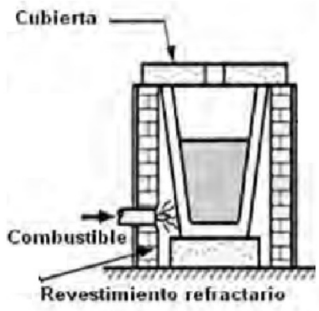


Figura 3. Horno de crisol fijo [3]

Crisol basculante

Estos tipos de hornos son similares a los de crisol fijo ya que para extraer el material fundido no se retira el crisol, sin embargo, tienen la gran diferencia de que este tipo de

hornos se inclinan para que el material fundido salga por uno o varios canales que van fijos en el mismo horno.

Figura 4. Horno basculante Nabertherm [7]

Crisol móvil

Este tipo de hornos de diferencia de los otros dos en el hecho de que se diseñan pensando en la extracción del crisol una vez fundido el material, lo cual permite utilizar una gran variedad de crisoles si es que el tamaño del horno lo permite.

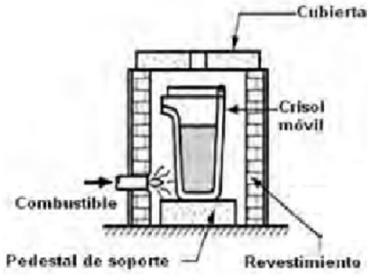


Figura 5. Horno de crisol móvil [3]

Crisoles

Un crisol es un recipiente refractario capaz de soportar altas temperaturas (1100°C - 3000°C) sin deformarse ni reaccionar con el material que contiene [8].

Ventajas: [8]

- Pureza del metal fundido gracias a la separación del combustible y el material.
- Flexibilidad para trabajar con lotes pequeños o medianos.
- Compatibilidad con distintos metales y aleaciones.

- Mantenimiento sencillo y reemplazo independiente del crisol.

Desventajas: [8]

- Capacidad limitada para producción masiva.
- Vida útil reducida del crisol por desgaste térmico y químico.
- Menor eficiencia energética frente a hornos cerrados de alta tecnología.
- Riesgo de contaminación si se usa un crisol inadecuado.

Existen 3 principales materiales utilizados en crisoles detallados en la Tabla 3 en la cual además se observan las distintas propiedades y capacidades de los materiales [8].

Tabla 3. Características de los principales materiales de crisol [9]

Material	Temperatura máxima °C	Resistencia al choque térmico	Resistencia química	Aplicaciones típicas
Alúmina	1700-1900	Moderado	Excelente (resistencia a ácidos y bases)	Fusión de metales de alta pureza (por ejemplo, Pt, Pd), procesamiento de vidrio, síntesis de semiconductores.
Grafito	2500-3000	Alta (atmósfera inerte)	Bueno (se oxida en el aire)	Fundición de metales no óxidos (por ejemplo, Cu, Al), hornos de vacío, síntesis de carburos.
Sílice	Corto plazo: 1100–1300°C (se ablanda a ~1670°C) Largo plazo: ≤1050°C (para evitar la desvitrificación).	Excelente: puede soportar cambios rápidos de temperatura (por ejemplo, enfriamiento con agua).	Resistente a ácidos (excepto HF), halógenos y agua. Pobre frente a álcalis (p. ej., NaOH/KOH) y ácido fosfórico.	**Semiconductores:** Crecimiento de cristales de silicio mediante el método Czochralski (CZ). **Metalurgia:** Fundición de metales nobles (Au, Ag). **Química:** Digestiones ácidas, reacciones de alta pureza. **Óptica:** Carcasas de lámparas UV, componentes láser. **Laboratorio:** Crisoles de alta temperatura de uso general.

(a) (b) (c)

Figura 6. (a) Crisol de Alúmina; (b) Crisol de Grafito; (c) Crisol de Sílice

Habiendo definido a los elementos que contienen al metal que se busca fundir (crisoles) y los elementos encargados de generar calor pasamos a los elementos encargados de mantener dicho calor en la cámara interna disminuyendo las pérdidas térmicas (Tabla 4).

Materiales refractarios en hornos

Los materiales refractarios son resistentes a fenómenos como la corrosión y degradación, además poseen una propiedad llamada refractariedad de calor igual o superior a 1500°C. Estos materiales soportan cambios bruscos de temperatura, fatiga mecánica, tensiones térmicas, fenómenos mecánicos como abrasión, erosión y fenómenos químicos. Sus capacidades y resistencias se deben a que están compuestos por múltiples elementos como sílice, manganesita, cromita y alúmina [10].

Clasificación de materiales refractarios [10]

Si bien los distintos materiales refractarios cumplen funciones similares, sus composiciones varían entre sí, por lo que se clasifican en tres grupos:

Refractarios Básicos: Poseen una base de sílice en múltiples formas.

Refractarios Neutros: Poseen una base de chamote o bauxita, los cuales poseen estabilidad al interactuar químicamente con bases y ácidos

Refractarios Ácidos: Poseen una base de óxidos de calcio y magnesio.

Tabla 4. Composición de materiales refractarios [10]

Material refractario	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Otros
Básicos				
Dolomita	-	-	38 – 50	38 – 50 CaO

Manganesita	0,5 – 5	-	91 - 98	0,6 – 4 CaO
Neutros				
Magnesita – Cromo	2 – 7	6 – 13	50 - 82	18 – 24 Cr_2O_3
Carburo de silicio	6	2	-	91 SiC
Ladrillo de alta alúmina	0 – 50	45 – 99	-	-
Ácidos				
Ladrillo de sílice	95 – 99	-	-	-
Ladrillo refractario de alta temperatura	53	42	-	-
Ladrillo refractario de alta resistencia	51 – 54	37 – 41	-	-
Circonio	32	-	-	66 ZrO_2

Materiales de fundición

Los materiales más comunes de fundición en el área docente universitaria son los metales no ferrosos, debido a factores como variedad, disponibilidad, presupuesto, flexibilidad, accesibilidad y hornos disponibles.

Materiales no Ferrosos

Los metales no ferrosos son metales que no contienen hierro ni elementos ferrosos. En consecuencia, todos los metales en estado puro son no ferrosos, excepto el Hierro (Fe).

Además, este tipo de metal tiende a ser más caro que su contraparte ferrosa. Sin embargo, sus sorprendentes propiedades (Tabla 5), como la resistencia a la oxidación y la corrosión, la facilidad de fabricación y las capacidades de cero magnetismos, hacen que los fabricantes pasen por alto el costo [11].

Otra razón por la que los fabricantes pasan por alto el costo de este metal es su reciclabilidad. Es más fácil y consume menos energía reciclar metales no ferrosos. Los procesos necesarios para reciclarlos incluyen la refundición. Lo cual facilita las experiencias de laboratorios estudiantiles ya que estos pueden ayudar a recolectar material.

Los metales no ferrosos incluyen; aluminio, cobre, plomo, níquel, titanio y estaño. También incluyen metales preciosos como plata, oro, tungsteno, vanadio, mercurio y cobalto [11].

Dentro de los metales no ferrosos en la industria manufacturera industrial y docente, el aluminio es de los más usados, debido a que es un metal altamente versátil y popular en la industria manufacturera, debido a su alta conductividad térmica y eléctrica, relativo bajo punto de fusión (660,32°C) y su excelente resistencia a la corrosión debido a una delgada capa superficial de óxido que se forma de manera natural protegiendo la integridad de la estructura [12].

Además, es un material fácil de adquirir ya que se puede reciclar de elementos comunes como lo son una gran variedad de latas ocupadas en bebestibles y otros productos.

Tabla 5. Propiedades del aluminio [12]

Propiedad	Valor [Unidad]
Calor específico líquido	2700 [kg/m^3]
Calor específico sólido	900 [J/(kg*K)]
Temperatura de fusión	660 [°C]
Calor latente de fusión	397000 [J/kg]
Temperatura de vaciado	750 [°C]
Densidad	2700 [kg/m^3]

Si bien el aluminio es un material altamente utilizado en la industria, también se tiene los metales ferrosos.

Metales Ferrosos

Los metales ferrosos son aquellos cuyo componente principal es el hierro. Estos metales son reconocidos por su excepcional resistencia, durabilidad y adaptabilidad, lo que los convierte en elementos esenciales en diversas industrias.

Los metales ferrosos, como el acero inoxidable y el acero dulce, presentan varias propiedades definitorias que los hacen indispensables en aplicaciones de construcción, fabricación e ingeniería:

- **Resistencia y durabilidad**: Los metales ferrosos, conocidos por su excepcional resistencia a la tracción, son muy adecuados para usos estructurales y de soporte de carga.
- **Propiedades magnéticas**: Muchos metales ferrosos, incluidos el acero dulce y el hierro fundido, presentan características magnéticas, que resultan valiosas en contextos eléctricos e industriales.

- **Susceptibilidad a la corrosión**: Los metales ferrosos que contienen hierro son propensos a la oxidación y al óxido cuando se exponen a la humedad y al oxígeno. Sin embargo, las aleaciones como el acero inoxidable contienen cromo, lo que mejora considerablemente su resistencia a la corrosión.
- **Rentabilidad**: Numerosos metales ferrosos, como el acero dulce, son económicos de producir y ampliamente accesibles, lo que los convierte en una opción asequible para proyectos a gran escala.

Las aleaciones ferrosas son un subconjunto de metales ferrosos que combinan hierro con otros elementos para mejorar propiedades específicas. Por ejemplo:

- **Acero al carbono**: La combinación de hierro con cantidades variables de carbono da como resultados materiales que van desde el acero dulce hasta el acero de alta resistencia, que se utilizan en la construcción, la automoción y aplicaciones industriales.
- **Acero inoxidable**: La adición de cromo y níquel mejora la resistencia a la corrosión, lo que lo hace adecuado para usos médicos, culinarios y arquitectónicos.
- **Acero aleado**: Se le añaden elementos como manganeso, vanadio y molibdeno para mejorar su resistencia, dureza y resistencia al desgaste; ideal para componentes de la industria automotriz y aeroespacial. [13]

Habiendo definido los tipos de metales más utilizados, sus propiedades, características y aplicaciones se procede a detallar sobre los mecanismos de transferencia de calor.

Métodos de transferencia de calor

Los fenómenos de transferencia de calor refieren a la interacción entre partículas a través de un medio en el cual existen partículas con diferentes temperaturas. La transferencia de calor se divide en tres mecanismos de transferencia: conducción, convección y radiación.

Conducción

El método de transferencia de calor por conducción es el cual depende directamente de la capacidad de conducción térmica “k” del material, el área superficial y el largo de este.

Convección

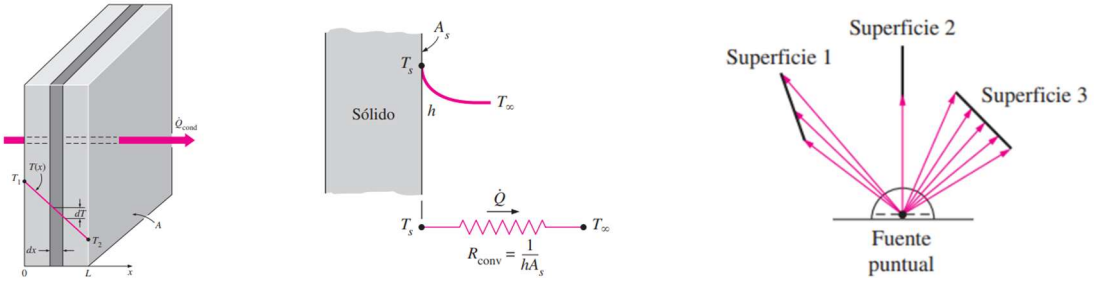
El fenómeno de convección ocurre en superficies donde las temperaturas de estas están lo suficientemente alejadas de la temperatura del ambiente en las que se encuentran. Generando así

un aumento en la transferencia de calor; esta convección puede ser natural o forzada. El calor emitido por la convención depende además del coeficiente de convección “h” y el área superficial.

Radiación

La transferencia de calor por medio de radiación ocurre por medio de ondas electromagnéticas.

A diferencia de otros medios de transferencia de calor este no necesita un medio para propagarse.



(a) (b) (c)

Figura 7. (a) Conducción; (b) Convección; (c) Radiación [14]

Teniendo definidas las bases de la fundición, materiales, tipos de hornos, mecanismos de transferencia de calor, aislantes y crisoles procedemos a aplicar las metodologías de diseño que permitirán diseñar un horno de fundición con capacidad de fundir aluminio, realizar tratamientos térmicos y carga de 2 litros de material

CAPÍTULO 2. Metodología

Esta sección se enfoca en presentar la metodología utilizada en el desarrollo del diseño del horno de fundición, detallando paso a paso la forma en la que se llevó a cabo el proyecto de tesis. Para este se comienza identificando la problemática a abordar para luego ir desarrollando los distintos análisis y tomas de decisiones acorde a la estructura definida e investigaciones realizadas.

Se utiliza la siguiente metodología para llevar a cabo un buen diseño que cumpla con las expectativas y requerimientos (Figura 8). 1) Definir el problema, 2) Buscar información, 3) Generar alternativas, 4) Evaluar alternativas 5) Generar diseño 6) Comparar con diseños existentes.

1.1. Descripción del proceso de diseño

Existen múltiples formas de abordar los procesos de diseño, sin embargo, de las formas que presentan una estructura definida y estandarizada, destaca la morfología del diseño de Morrus Asimow, donde esta morfología contiene tres etapas, siendo estas el diseño conceptual, diseño estructurado y el diseño de detalle.

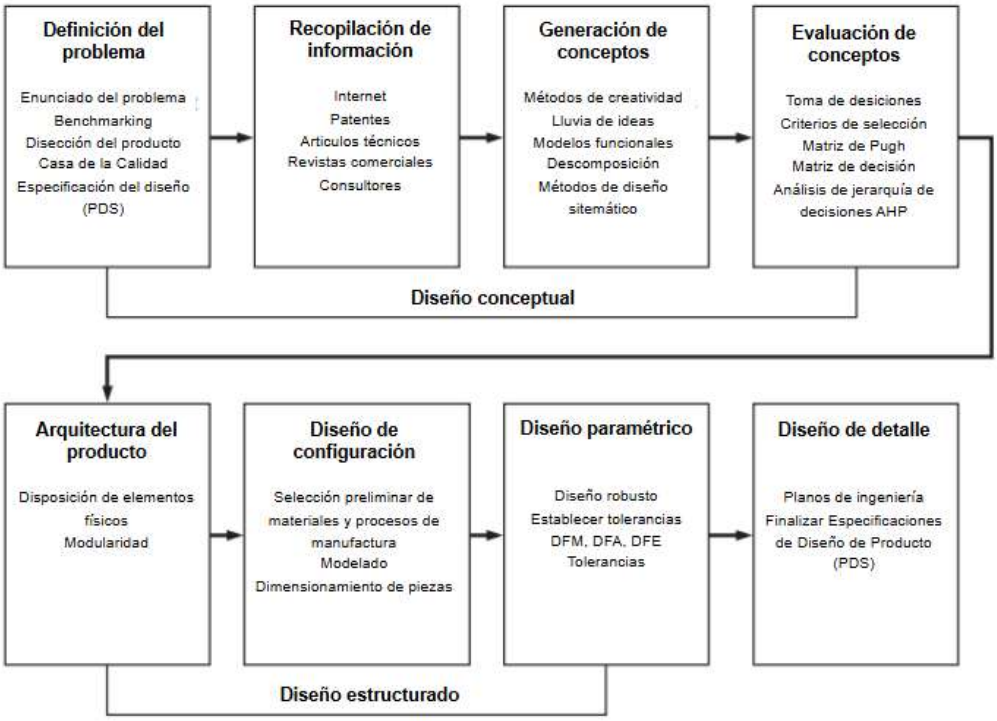


Figura 8. Morfología del diseño [15]

Etapa 1: Diseño conceptual

El diseño conceptual es el proceso mediante el cual se inicia el diseño, se desarrolla hasta el punto de generar una serie de posibles soluciones y, finalmente, se reduce a un único concepto óptimo. En ocasiones, a esto se le denomina *estudio de factibilidad*. El diseño conceptual es la fase que exige la mayor creatividad, implica la mayor cuota de incertidumbre y requiere de la coordinación entre diversas funciones dentro de la organización empresarial. A continuación, se presentan las actividades específicas que se consideran dentro del diseño conceptual: 15]

- **Identificación de las necesidades del cliente:** El objetivo de esta actividad es comprender a fondo las necesidades de los clientes y comunicarlas claramente al equipo de diseño, de tal manera que el producto final satisfaga adecuadamente dichas necesidades.

- **Definición del problema:** El objetivo de esta actividad es crear un enunciado que describa exactamente qué es lo que se debe lograr para satisfacer las necesidades del cliente. Esto implica analizar los productos de la competencia (benchmarking), establecer las especificaciones objetivo y elaborar una lista de las restricciones y los criterios de compromiso (*trade-offs*). Una vez realizada una tabla comparativa de lo anterior se procede a realizar el Despliegue de la Función de Calidad (QFD, por sus siglas en inglés).

  "La Casa de la Calidad" o matriz QFD (Quality Function Deployment), es una herramienta y metodología que permite al usuario relacionar las distintas variables, características y funciones del diseño con las necesidades y requerimientos del cliente, permitiendo así visualizar de manera efectiva la información relacionada al diseño permitiendo así priorizar las que se consideren de mayor importancia y criticidad.

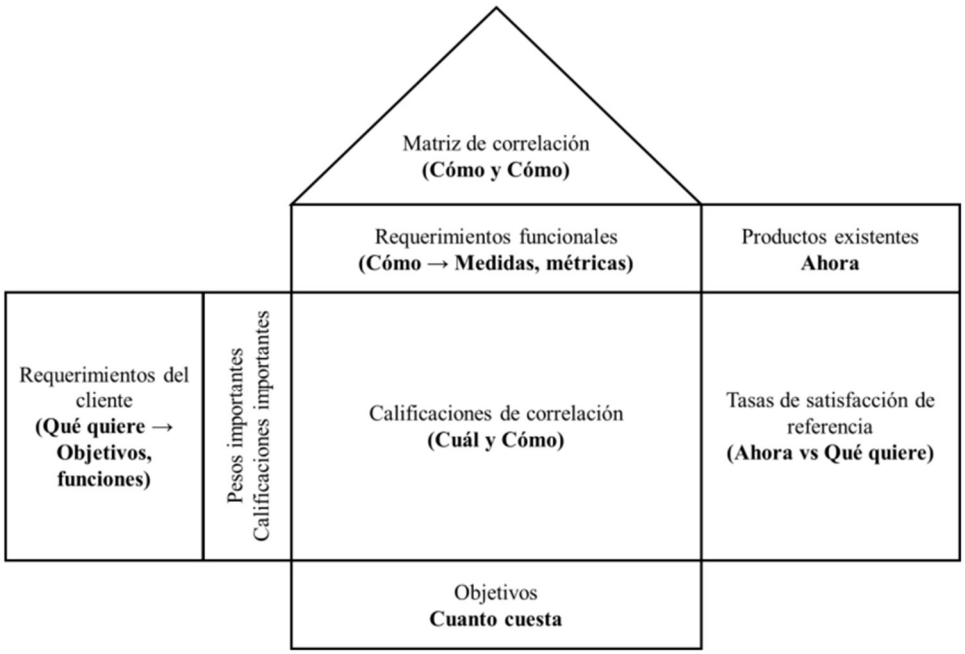


Figura 9. Composición de la Casa de la Calidad

Para construir una buena Casa de la Calidad es necesario tener las siguientes consideraciones:

1) **Identificar y entender las necesidades del cliente:**
   Las necesidades del cliente se ubican en la sección izquierda de la matriz, donde es necesario preguntarse qué quiere el usuario final, cuáles son los objetivos que espera cumplir y qué otras necesidades implícitas tienen que no hayan expresado directamente. Además de enumerar dichas necesidades, se les otorga un peso ponderado según su nivel de importancia (del 1 al 10 o en porcentaje).

2) **Priorizar acorde a criticidad**
   En la zona central se realiza el cruce entre los requerimientos funcionales de ingeniería (columnas) y las necesidades del cliente (filas). En dicho cruce se evalúa en qué medida una métrica técnica ayuda a satisfacer un deseo del cliente. A esta intersección se le asigna un nivel de relación definido por los siguientes símbolos: ▽, ○ y ●, los cuales indican una relación débil (1), moderada (3) o fuerte (9), respectivamente.

3) **Evaluar relaciones y comparar**
   En la zona superior (matriz de correlación o "techo" de la casa) se relacionan los distintos requerimientos funcionales entre sí. El objetivo es identificar si estos dependen unos de otros, detectando sinergias (correlaciones positivas) o conflictos técnicos (correlaciones negativas, como el hecho de que aumentar la temperatura máxima encarece el costo de producción).

4) **Priorización**
   En la sección inferior de la Casa de la Calidad se calculan los pesos técnicos absolutos y relativos de cada requerimiento funcional, multiplicando la importancia dada por el cliente por el valor de la matriz central. Con estas prioridades matemáticas claras, el equipo de ingeniería establece las metas cuantitativas exactas (Targets) que el diseño debe cumplir.

5) **Decisión final y oportunidad de mejora**

Una vez que se cubren las secciones centrales de la matriz, se analiza la zona lateral derecha (Productos existentes o Benchmarking). Aquí se comparan las tasas de satisfacción de nuestro diseño conceptual frente a las alternativas que ya existen en el mercado. Esta evaluación integral permite visualizar gráficamente las fortalezas del equipo, justificar las decisiones de diseño tomadas e identificar áreas donde el proyecto tiene una clara ventaja competitiva.

- **Recopilación de información:** Este paso busca realizar búsquedas específicas como patentes, artículos técnicos y más, con un enfoque en los resultados obtenidos en la definición del problema y sus distintas herramientas (benchmarking, QFD, etc.).
- **Generación de conceptos:** Se utilizan herramientas creativas como la lluvia de ideas, la cual permite al usuario visualizar un abanico de posibilidades más amplio, al plantear ideas sin previamente evaluar la factibilidad de estas. Por consiguiente, se logran obtener nuevos puntos de vistas sobre posibles soluciones que probablemente no se habrían logrado sin dicha lluvia de ideas. De la lluvia de ideas se deriva la carta morfológica, esta es de vital importancia en el diseño ya que permite organizar y analizar todas las posibilidades de diseño en busca de encontrar múltiples soluciones que satisfagan las necesidades del cliente, permitiendo así comparar y elegir las opciones más adecuadas aterrizando los conceptos planteados en la lluvia de ideas a elementos puntuales y tangibles.

Etapa 2: Diseño estructurado

El desarrollo estructurado del concepto tiene lugar en esta fase del diseño de ingeniería. Es aquí donde se le da forma tangible y se consolida el "esqueleto" del concepto de diseño inicial. En esta etapa se debe llevar a cabo la materialización de todas las funciones principales que el producto debe desempeñar. Es precisamente en esta fase donde se toman las decisiones críticas referentes a la resistencia mecánica, la selección de materiales, las dimensiones, la geometría y la compatibilidad espacial. Superada esta etapa del diseño, realizar modificaciones mayores resulta sumamente costoso. Por este motivo, a esta fase suele denominársele diseño preliminar. El diseño estructurado se centra en tres tareas fundamentales: la arquitectura del producto, el diseño de configuración y el diseño paramétrico. [15]

Arquitectura del producto

La arquitectura del diseño hace referencia a el conjunto de elementos que conforman el producto y como estos interactúan entre sí, estando compuesta esta sección por:

Sistemas y subsistemas: Para un correcto diseño es necesario definir y diferenciar los componentes o conjunto de componentes que conforman los sistemas y subsistemas, aclarando sus ubicaciones, interacciones y requerimientos

Configuración de diseño: Ya definidos los sistemas y subsistemas es necesario determinar las configuraciones óptimas de los distintos elementos y componentes de manera de que cumplan con los requerimientos, objetivos y restricciones del cliente.

Diseño paramétrico: En esta sección del diseño se determinan los materiales, dimensiones y procesos de fabricación y ensamble requeridos para materializar el diseño propuesto.

Tipo de arquitectura

Debido al requerimiento del cliente de poder intercambiar componentes de manera eficiente, la opción de diseño que favorece dicha solicitud es un diseño modular. Existen tres tipos de arquitecturas modulares, siendo estas ranura, bus y seccional.

Arquitectura modular de ranura: Este tipo de arquitectura consiste en organizar sus elementos en posiciones y ángulos específicos, lo cual en ciertos casos puede limitar las opciones disponibles [15].

Arquitectura modular de bus: Los módulos se pueden ensamblar a lo largo de una interfaz común, o bus. Por lo tanto, el intercambio de módulos se puede realizar con facilidad. El uso de un bus de alimentación es común en los productos eléctricos, pero también se puede encontrar en sistemas mecánicos, como en las estructuras de estanterías [15].

Arquitectura modular seccional: Todas las interfaces son de un tipo común, pero no existe un elemento base o principal único al cual se acoplen los demás componentes (o bloques). El diseño se construye conectando los módulos entre sí a través de interfaces idénticas, como ocurre en un sistema de tuberías [15].

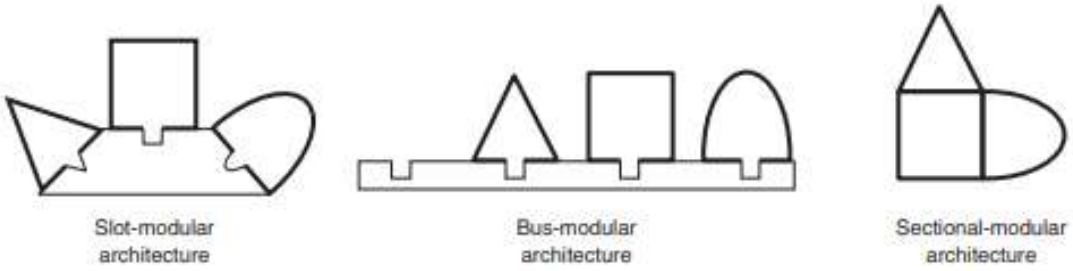


Figura 10. Arquitectura del diseño modular [15]

Etapa 3: Diseño de detalle

En esta fase, el diseño evoluciona hasta convertirse en la descripción de ingeniería completa de un producto validado y listo para su producción. Aquí se integra toda la información técnica definitiva, estableciendo la disposición, geometría, dimensiones, tolerancias, propiedades superficiales, materiales y procesos de manufactura para cada componente. Este nivel de exhaustividad genera especificaciones precisas tanto para las piezas de fabricación a medida, como para los componentes estandarizados que deben adquirirse a través de proveedores externos. Durante la fase de diseño de detalle se concretan actividades críticas y se genera la documentación oficial, destacando:

- **Planos de ingeniería detallados aptos para manufactura:** Habitualmente generados mediante herramientas computacionales, los cuales con frecuencia incluyen modelos tridimensionales (CAD) para garantizar el correcto ensamblaje e integración espacial. [15]

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE HORNO DE FUNDICIÓN

Antecedentes

Esta propuesta de tesis surge en la UTFSM tras la falla crítica del horno basculante (Figura 11) ubicado en el taller metalmecánico, quedando fuera de servicio provocando una interrupción a las actividades académicas y de investigación que dependen de procesos de fundición. Obligando a los docentes, alumnos e investigadores a utilizar equipamiento en campus Valparaíso u otras instituciones.

Figura 11. Horno basculante UTFSM

Dentro de las actividades realizadas por el curso de procesos de manufactura MEC160 está el diseño y fabricación de rines de automóvil mediante la fundición de aluminio y posterior mecanizado, proceso el cual demora más tiempo de lo esperado debido a la cantidad de alumnos, la limitada capacidad de carga de 750 ml del horno basculante disponible en el campus San Joaquín y su limitación de temperatura de 1100 °C la cual limita las opciones de materiales que se pueden fundir, por lo que esta propuesta de diseño de horno permitirá tener un proceso de fundición en paralelo que satisfaga las necesidades y requerimientos del equipo docente aumentando sustancialmente la capacidad de fundición y reduciendo los tiempos requeridos, permitiendo así ocupar los equipos para otras actividades. Además, el nuevo diseño a generar permitirá realizar tratamientos térmicos, proceso que actualmente no es posible realizar en las instalaciones de la UTFSM campus “San Joaquin”, por lo que se podrán agregar nuevas actividades al currículo del departamento tanto en clases como investigaciones.

Figura 12. Prototipo de rin MEC160

Listado de atributos

Tomando en cuenta los antecedentes, equipos ya existentes, recursos e implementos que posee el departamento de ingeniería civil mecánica y las necesidades del cliente se llevó a cabo la confección de un listado de atributos que se esperan del horno a diseñar, siendo los siguientes:

- Aislar calor.
- Alcanzar temperatura de 1300°C.
- Bajo costo de adquisición.
- Bajo costo de operación.
- Bloqueo automático de potencia al abrir el horno.
- Bloqueo automático de potencia por falla de actuador.
- Bloqueo automático de potencia por falla de sensor.
- Cámara interna aislada.
- Componentes de alta a media disponibilidad.
- Componentes en mercado local.
- Compuerta aislada térmicamente.
- Contener crisol.
- Control de temperaturas digital automatizado.
- Controlador resistente a ruidos eléctricos.
- Convertir corriente alterna CA a corriente continua CC.
- Costo de fabricación menor a 4.000.000 CLP.
- Dimensionamiento de altura base para extracción segura del crisol.

- Dimensiones máximas (1000 mm x 1000 mm x 1000 mm de alto).
- Diseño que permita utilizar crisol del cliente (197 mm de alto x 162 mm de diámetro mayor).
- Generar calor.
- Interfaz intuitiva para el usuario.
- Limpieza periódica y fácil.
- Manipulación segura de la compuerta.
- Mantenimiento económico.
- Medir la temperatura interna del horno.
- Mostrar la temperatura interna del horno.
- Mostrar temperatura objetivo.
- Mostrar tiempo de operación.
- Peso máximo de 350 kg.
- Rampa de temperatura controlada.
- Sistema de protección eléctrica.
- Superficies exteriores aisladas térmicamente.
- Tensión de operación de 220 [V].
- Uso de elementos mantenibles.
- Utilización de piezas comerciales.

Objetivos, Funciones y Restricciones

Objetivos:

- Bajo costo de operación.
- Mantenimiento económico.
- Limpieza periódica y fácil.
- Interfaz intuitiva para el usuario.
- Superficies exteriores aisladas térmicamente.
- Sistema de protección eléctrica.
- Rampa de temperatura controlada.
- Control de temperaturas automatizado.

- Componentes en mercado local.
- Utilización de piezas comerciales.
- Componentes de alta a media disponibilidad.
- Cámara interna aislada.
- Manipulación segura de la compuerta.
- Dimensionamiento de altura base para extracción segura del crisol.
- Bloqueo automático de potencia por falla de sensor.
- Bloqueo automático de potencia por falla de actuador.
- Bloqueo automático de potencia al abrir el horno.
- Uso de elementos mantenibles.
- Controlador resistente a ruidos eléctricos.
- Bajo costo de adquisición.

Funciones:

- Convertir corriente alterna CA a corriente continua CC.
- Medir la temperatura interna del horno.
- Mostrar la temperatura interna del horno.
- Generar calor.
- Aislar calor.
- Contener crisol.
- Mostrar tiempo de operación.
- Mostrar temperatura objetivo.

Restricciones:

- Diseño que permita utilizar crisol del cliente (197 mm de alto x 162 mm de diámetro mayor).
- Dimensiones máximas (1000 mm x 1000 mm x 1000 mm de alto).
- Costo de fabricación menor a 4.000.000 CLP.
- Alcanzar temperatura de 1300°C.
- Peso máximo de 350 kg.
- Tensión de operación de 220 V.

Categorización de objetivos del cliente

Ya definidos los requerimientos del cliente y sus necesidades, procedemos a clasificar los objetivos en las categorías de operación, seguridad, económico y mantenimiento.

Operación:

- Interfaz intuitiva para el usuario.
- Rampa de temperaturas controlada.
- Control de temperaturas automatizado.
- Cámara interna aislada.
- Controlador resistente a ruidos eléctricos.

Seguridad:

- Superficies exteriores aisladas térmicamente.
- Sistema de protección eléctrica.
- Dimensionamiento de altura base para extracción segura del crisol.
- Bloqueo automático de potencia por falla de sensor.
- Bloqueo automático de potencia por falla de actuador.
- Bloqueo automático de potencia al abrir el horno.
- Manipulación segura de la compuerta.

Económico:

- Bajo costo de operación.
- Bajo costo de adquisición.

Mantenimiento y Fabricación:

- Mantenimiento económico.
- Limpieza periódica y fácil.
- Componentes en mercado local.
- Utilización de piezas comerciales.
- Componentes de alta a media disponibilidad.
- Uso de elementos mantenibles

Jerarquización de objetivos con pesos ponderados

Los objetivos de diseño son jerarquizados según criterios de diseño acorde a los criterios especificados por el cliente. Para ordenar los objetivos por importancia, sin realizarlo de manera arbitraria, se les asignan pesos relativos utilizando la escala de importancia relativa de Saaty (1986), adaptada para el diseño.

Tabla 6. Lista de objetivos con pesos ponderados

Operación (**30%**)	Seguridad (**40%**)	Económico (**20%**)	Mantenimiento y fabricación (**10%**)
Cámara interna aislada. (**6%**)	Superficies externas aisladas térmicamente. (**10%**)	Bajo costo de operación. **(5%)**	Mantenimiento económico. (**1,5%**)
Interfaz intuitiva para el usuario. (**2%**)	Sistema de protección eléctrica. (**6%**)	Bajo costo de fabricación (**15%**)	Utilización de piezas comerciales. (**2%**)
Rampa de temperaturas controlada. (**8%**)	Bloqueo automático de potencia por falla de actuador**. (6%)**		Limpieza periódica y fácil. (**2%**)
Control de temperaturas automatizado. (**6%**)	Dimensionamiento de altura base para extracción segura del crisol. (**3%**)		Componentes en mercado local. (**2%**)
Controlador resistente a ruidos eléctricos. (**8%**)	Bloqueo automático de potencia por falla de sensor**. (6%)**		Componentes de alta a media disponibilidad. (**1%**)
	Manipulación segura de la compuerta. (**3%**)		Uso de elementos mantenibles. (**1,5%**)
	Bloqueo automático de potencia al abrir el horno**. (6%)**		

Análisis funcional

En esta sección se determinan y definen las funciones del producto a diseñar tomando en cuenta las entradas y salidas del sistema; utilizando los modelos de caja negra y caja transparente, en los cuales se presentan las funciones y subfunciones esperadas del horno.

1.2. Modelo de caja negra

En el modelo de caja negra se dan a conocer únicamente las entradas, salidas y función principal del sistema, sin detallar en las funciones internas de este.

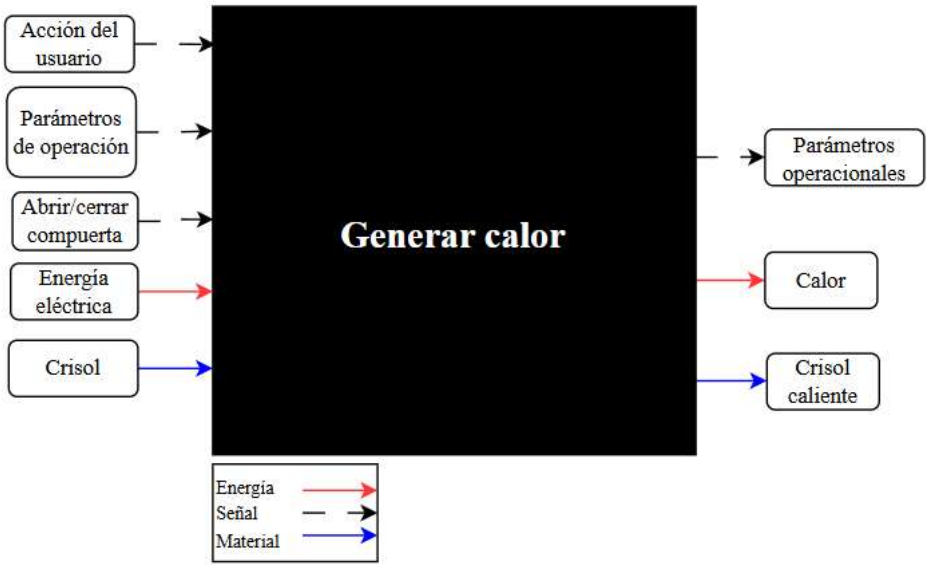


Figura 13. Modelo de caja negra

Árbol de funciones

En esta sección se materializan todas las funciones que se espera que sea capaz de realizar el producto a diseñar, ordenando estas de manera lógica. Dichas funciones corresponden a la parte que no se ve en la caja negra de la Figura 13.

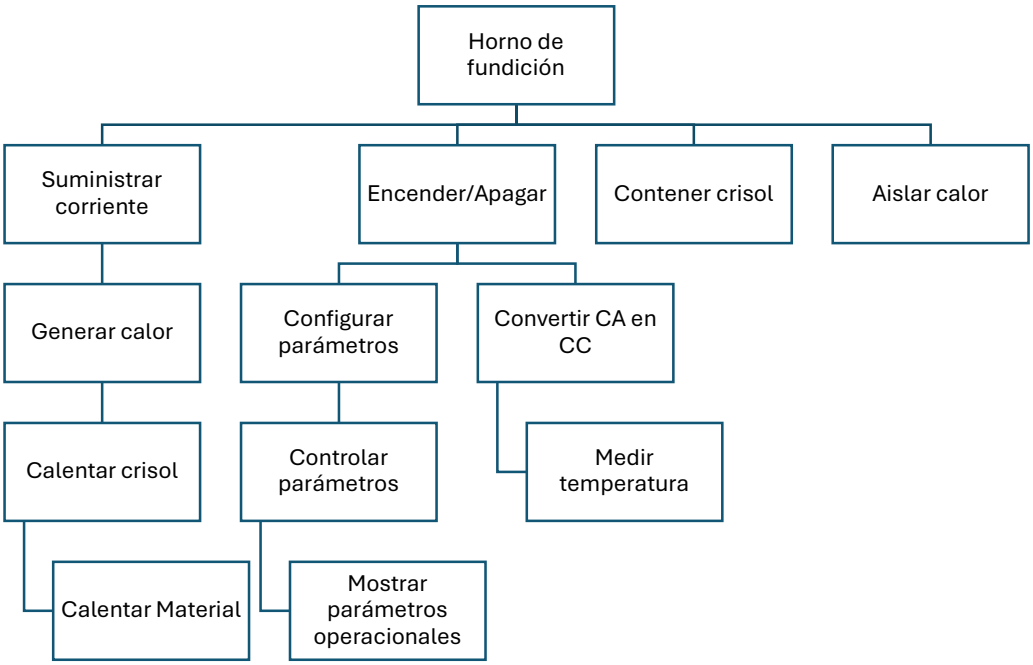


Figura 14. Árbol de funciones

Modelo de caja trasparente

A diferencia del modelo de caja negra, en el transparente se muestran las subfunciones que se esperan del horno de fundición como se ilustra en la Figura 15.

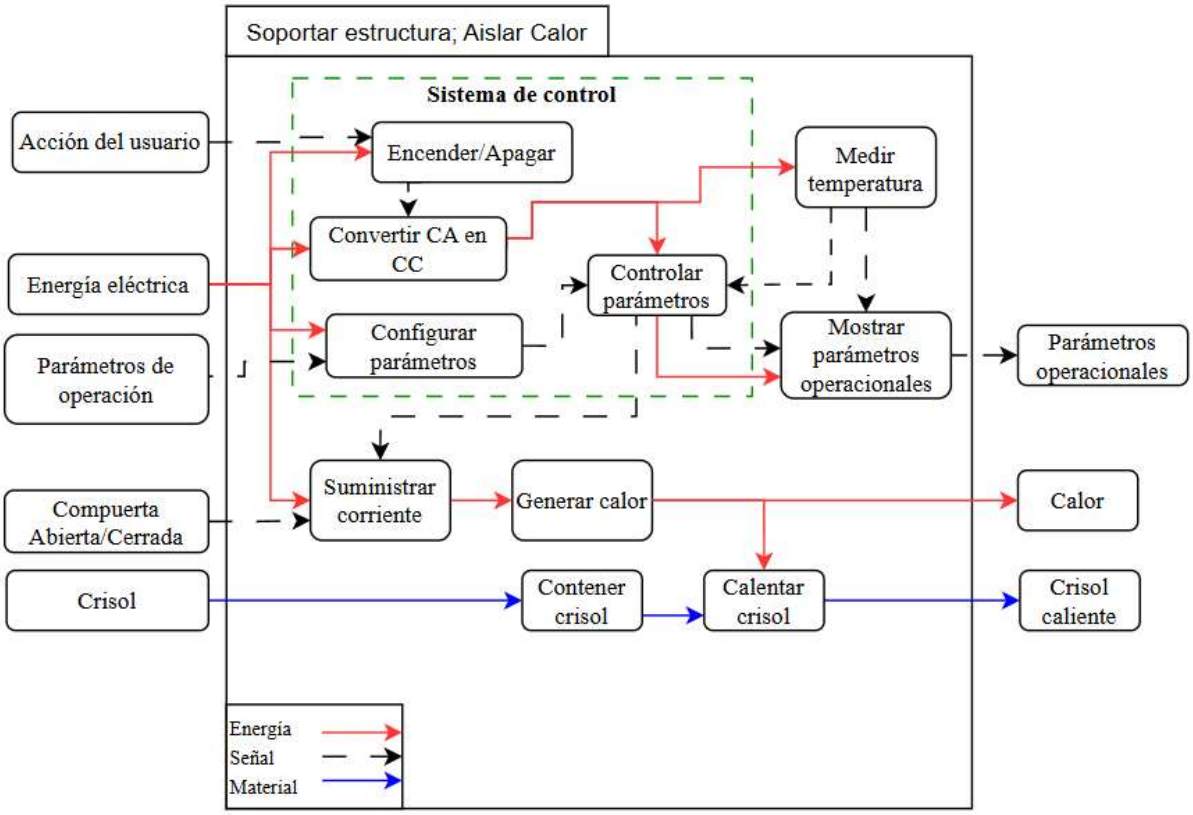


Figura 15. Modelo de caja transparente

Benchmarking externo

Realizar un benchmarking externo tiene como propósito comparar el horno a diseñar con los equipos ya existentes que cumplen funciones similares a las esperadas, generando una comparación con pesos ponderados de las capacidades que tiene cada horno y competidor de satisfacer las necesidades y objetivos impuestos por el cliente. Dicha comparación se realiza con una escala de 1 a 5 siendo 1 un desempeño pobre o insuficiente y 5 un desempeño sobresaliente.

Como ya se mencionó en los fundamentos teóricos, tenemos 2 tipos de energías en hornos, siendo estas combustión y electricidad, de las cuales debido a los requerimientos y objetivos sólo evaluaremos las siguientes:

- Competidor 1: Horno de resistencia eléctrica basculante Nabertherm.
- Competidor 2: Horno de mufla PROTHERM.
- Competidor 3: Horno de mufla KINTEK Tech.
- Competidor 4: Horno de arco indirecto Arcast.

Tabla 7. Benchmarking externo de competidores

	Opción 1 Nabertherm KC 2/13 [7]	Opción 2 PROTHERM PLF140/30	Opción 3 KINTEK-Tech KT-14M	Opció4 Arcast Arc200
Objetivos y requerimientos del diseño	Puntuación	Puntuación	Puntuación	Puntuación
Rampa de temperatura controlada	5	5	4	3
Uso de un crisol (fijo o móvil)	5	3	3	1
Componentes en mercado local	2	1	2	1
Mantenimiento económico	3	1	3	1
Componentes de alta a media disponibilidad	3	2	3	1
Bloqueo de potencia al abrir el horno	5	5	5	5
Diseño que permita usar crisol del cliente (196 x Ø162 mm)	1	5	4	1
Sistema eléctrico monofásico	5	5	5	1
Manipulación segura de la compuerta	5	5	5	4
Bajo costo de operación	4	2	3	3
Uso de elementos mantenibles	4	3	2	1
Superficies exteriores aisladas térmicamente	5	5	5	5
Sistema de protección energética	5	5	5	3
Diseño que permita limpieza periódica y fácil	2	3	3	1
Control de temperaturas digital automatizado	4	5	4	5
Bajo costo de adquisición	2	1	3	1
Alcanzar temperatura de 1300°C	5	5	5	5
Tamaño de laboratorio	5	4	5	3
Puntuación total:	70	64	71	44
Orden:	2	3	1	4

La Tabla 7 muestra que el competidor 3 obtuvo el puntaje total más alto, por lo que es uno de los competidores que se adapta de mejor manera a las necesidades y peticiones del cliente. Por esto mismo para la selección y diseño del horno para la Universidad Técnica Federico Santa María se tomará como referencia dicho diseño, realizando las modificaciones y mejoras que mejor se adapten a los objetivos ya definidos.

Listado de requerimientos técnicos

1) **Geometría**

   Dimensiones máximas del equipo: 1000 mm x 1000 mm x 1000 mm.

   Peso máximo del equipo: 350 kg.

2) **Carga y capacidad**

   Capacidad volumétrica máxima de cámara interna: 50 L.

   Compatibilidad de carga: Diseño ajustado a crisol del cliente (197 mm de alto x 162 mm de diámetro mayor).

3) **Sistema térmico**

   Rampas de temperatura programables.

   Temperatura máxima de operación: 1300 °C

   Tasa de calentamiento programable: ≤ 15 [°C/min]

4) **Energía**

   Sistema eléctrico monofásico (220V).

   Corriente nominal de consumo: ≤ 22 A

5) **Seguridad**

   Temperatura de las superficies exteriores: ≤ 60 °C.

6) **Costos**

   Costo de adquisición (CAPEX): ≤ 4.000.000 CLP.

Matriz de objetivos y métricas

A continuación, se muestra la sección de la matriz QFD correspondiente a la matriz de objetivos y métricas, sección en la cual se realiza el cruce de los requerimientos del cliente explícitos e implícitos con los requerimientos funcionales del sistema, definiendo como estos interactúan entre si y en la sección derecha se determinan los puntajes asociados a los requerimientos del cliente para cada producto analizado en el benchmarking y el propuesto a diseñar.

Requerimientos Funcionales / Requerimientos del Cliente (Explícitos e Implícitos)	Volumen exterior máximo [m^3]	Capacidad volumétrica de cámara interna [L]	Temperatura máxima de operación [°C]	Masa total del equipo [kg]	Tensión de alimentación [V]	Corriente nominal de consumo [A]	Tasa de calentamiento programable [°C/min]	Temperatura en superficie exterior [°C]	Costo de total [CLP]	Precisión de control térmico [±°C]	Capacidad de memoria de perfiles térmicos [-]	Nuestro Producto	Competidor #1: Nabertherm KC 2/13	Competidor #2: Protherm PLF 140/30	Competidor #3: KINTEK-Tech KT-14M	Competidor #4: Arcast Arc200
Protección térmica del operador	○		●				▽	●	○			4	5	5	5	5
Operación segura y protección eléctrica			○	▽	●	●		●	○			4	5	5	5	4
Extracción y manipulación ergonómica	●	○		●				○				4	5	3	3	2
Energía eléctrica monofásica		●	○		●	●			▽			5	5	5	5	1
Capacidad para crisol de 2 litros	○	●		●					▽			5	1	5	4	1
Fundición automatizada, precisa y personalizable			○				●		●	●	●	4	5	5	4	4
Bajo costo de fabricación	●	○		●	▽	▽	●	●	●	●	○	4	2	1	3	1
Eficiencia energética	▽	●	○	▽	▽	●	○	●	○			3	4	2	3	3
Equipo compacto	●	●		●				○	●			2	5	4	5	3
Repuestos comerciales y fácil mantenimiento					●	○			○	▽		5	3	2	3	1

Figura 16. Matriz de objetivos y métricas

Despliegue de la función de la calidad

A continuación, se muestra el despliegue de la función de la calidad, el cual se basa en la Figura 9 y se representa en la Figura 17

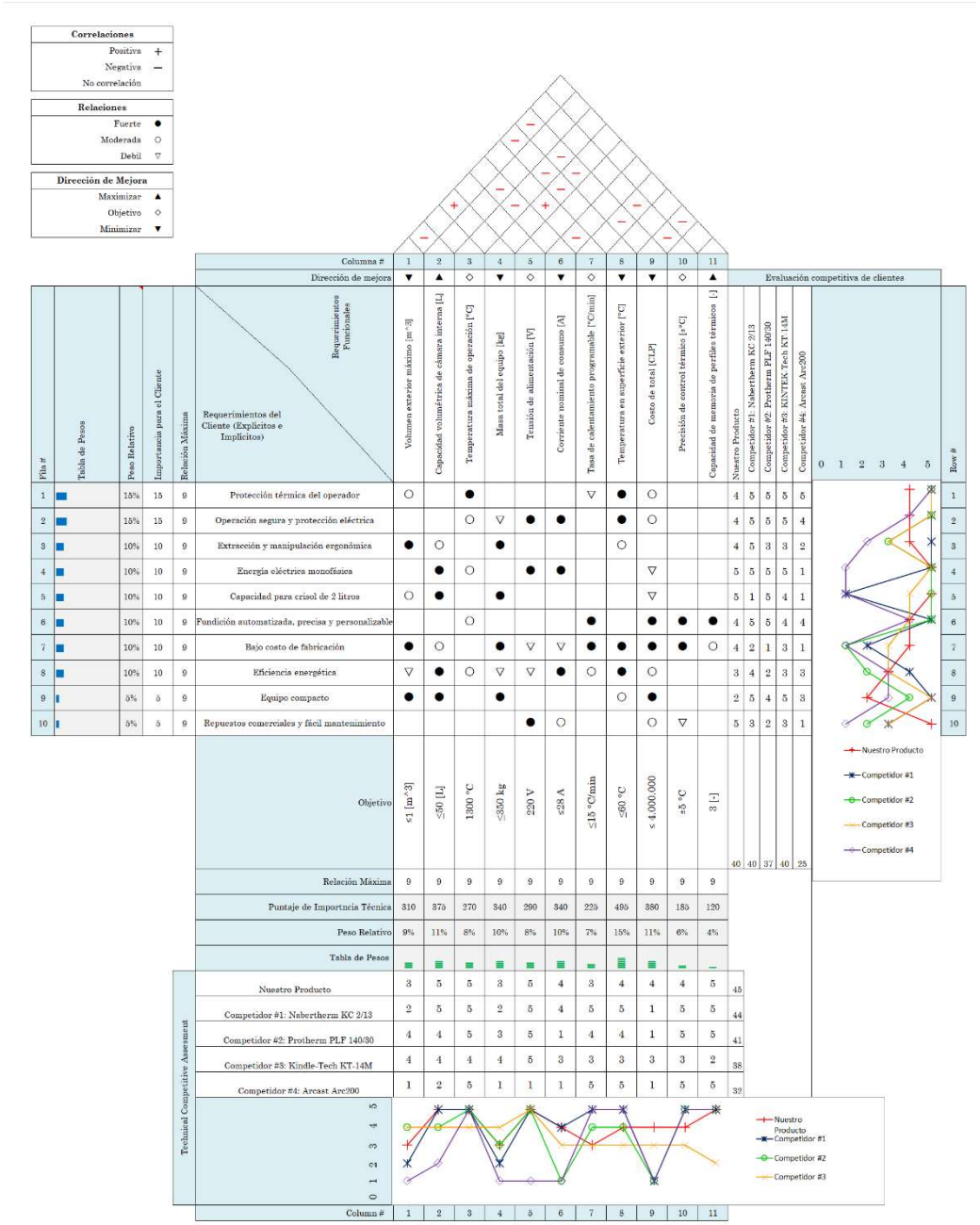


Figura 17. Matriz QFD

Resolución de contradicciones de los requerimientos

De la matriz QFD se evidencian las siguientes contradicciones, lo que implica que es necesario evaluar cómo resolverlas.

Tabla 8. Tabla de contradicciones TRIZ

Contradicción QFD (El Problema)	**Conflicto Técnico (Trade-off)**	**Principio de Diseño Aplicado**	**Directriz Conceptual para la Generación de Conceptos**
Temp. Máxima vs. Temp. Superficie	Lograr 1300°C adentro sin exceder los 90°C afuera.	Segmentación y Extracción	**Concepto de barrera térmica segregada:** Los conceptos generados deberán separar la función de resistir la temperatura de la función de aislarla, incluyendo necesariamente un medio de extracción de calor (ej. una cámara de flujo de aire pasivo o activo) antes de la chapa exterior.
Temp. Máxima vs. Corriente Nominal	Requerir alta potencia térmica sin superar el límite de 22A de la red.	Acción Periódica y Dinámica	**Concepto de modulación dinámica de potencia:** Los conceptos generados no usarán termostatos de estado binario (on/off largo), sino arquitecturas de control que permitan enviar pulsos de energía fraccionados para disminuir el amperaje promedio.
Masa Total vs. Costo Total	Reducir el peso exige materiales avanzados de alto costo.	Calidad Local	**Concepto de distribución selectiva de masa:** Los conceptos generados deberán evitar geometrías sólidas macizas. Se debe reservar el material de alto costo solo para la geometría útil, rellenando zonas estructurales secundarias o "volumen muerto" con aislantes livianos y de bajo costo.
Volumen Exterior vs. Cap. de Cámara	Mantener un equipo compacto por fuera, pero con espacio interno útil.	Asimetría y Anidamiento	**Concepto de anidamiento morfológico:** Los conceptos generados deberán abandonar la arquitectura clásica de "caja fuerte frontal" y adoptar formas que abracen el perfil del crisol cilíndrico, minimizando la distancia radial exterior (ej. configuraciones de carga superior o de campana elevable).

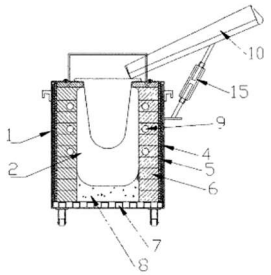
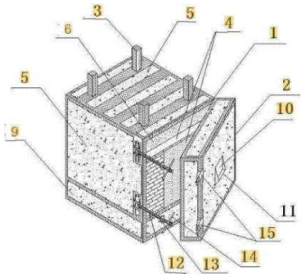
Con las contradicciones obtenidas de la matriz QFD analizadas en la tabla anterior, se procede a realizar la búsqueda externa de componentes y patentes que ayuden a resolver dichas contradicciones.

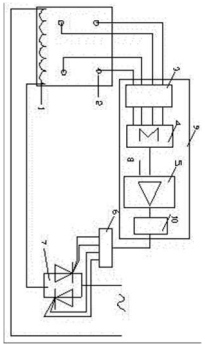
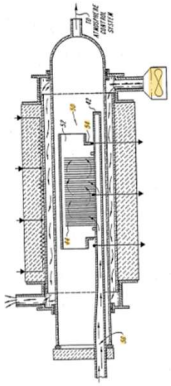
Generación de conceptos

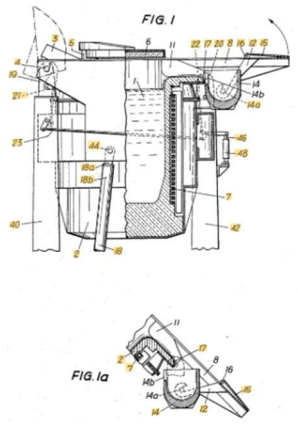
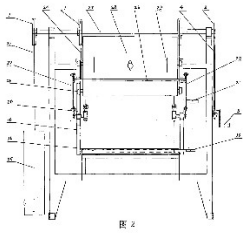
Para la generación de conceptos se realizan múltiples búsquedas externas y se aplican herramientas como la lluvia de ideas y carta morfológica.

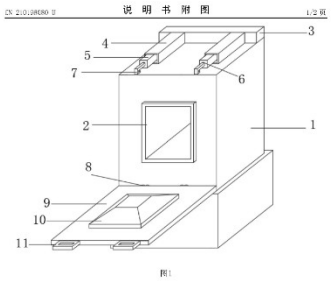
Búsqueda externa

Tabla 9. Búsqueda externa de patentes

Patente (Ref.)	**Enfoque Tecnológico**	**Problema Detectado (Estado del Arte)**	**Solución e Innovación Propuesta**
CN201828139U [16] 	**Arquitectura de Aislamiento**	Alto flujo térmico hacia el exterior en hornos de crisol con compuerta superior.	Uso de **revestimiento multicapa**: nano aislamiento, silicato de calcio y mullita en paredes; ladrillos y hormigón refractario en la base.
CN203668200U [17] 	**Eficiencia y Geometría**	Deficiente eficiencia térmica por exceso de "volumen muerto" e inercia térmica en equipos tradicionales.	**Optimización de la geometría** interna de la cámara alrededor del crisol para reducir la masa total, minimizando el gasto energético y la inercia térmica.

CN201828840U [18] 	**Control Eléctrico y Térmico**	Gradientes térmicos inexactos que impiden un control preciso y generan excesos de potencia (overshoot).	Sistema con **múltiples termocuplas tipo K** enlazadas a un controlador lógico (PID) y un **tiristor de fase (SSR/SCR)** para modular dinámicamente el voltaje/corriente.
US4802441A [19] 	**Disipación del Chasis Exterior**	Transmisión de calor por conducción directa que eleva peligrosamente la temperatura de la coraza externa.	Implementación de una **construcción de doble pared con cámara de aire (GAP)** y pasajes de ventilación para flujo convectivo enfriador.

US3486745A [20]  	**Mecanismos de Apertura**	Exposición directa del operador a la radiación y gran esfuerzo físico al levantar tapas pesadas (tipo guillotina).	Diseño de cubiertas montadas sobre **ejes pivotantes o rotatorios** que permiten apartar la tapa lateralmente liberando acceso al crisol por carga superior.
CN2182971Y [21] 	**Aligeramiento y Sellado**	Peso estructural excesivo de los ladrillos refractarios y pérdidas térmicas por ranuras no estancas.	Uso de **fieltro/manta de fibra cerámica multicapa** (reduciendo el peso 33-50%) y un diseño de puerta con **contacto elástico hermético** (+14% eficiencia).

CN201920376619U [22] 	**Mecanismos de Cierre Magnético/Mecánico**	Las bisagras y cerraduras convencionales dejan brechas que permiten fugas térmicas y caídas de eficiencia.	Mecanismo de sujeción (con actuadores o tensores mecánicos) que obliga al **bloque refractario a encajar a presión y sin brechas** contra la cámara.

Lluvia de ideas

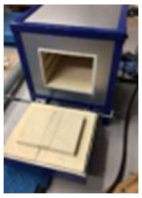
La lluvia de ideas representada en la Figura 18 se centra en determinar los sistemas que compone al horno detallando las funciones que se espera que cumpla.

Figura 18. Lluvia de ideas

Carta morfológica

De los sistemas y funciones detallados en la lluvia de ideas y listado de atributos, se genera una carta morfológica con conceptos que se adecuan a las restricciones del diseño.

Tabla 10. Carta morfológica

Función	Conceptos		
Generar calor	Resistencias eléctricas	Barras de Carburo de Silicio	Resistencias de Disiliciuro de Molibdeno
Transformar de CA a CC	Controlador programable	Convertidor AC-DC	Fuente de poder
Controlar parámetros	Controlador programable	Arduino	PLC
Mostrar parámetros	Controlador programable	Pantalla LCD	Panel HMI
Sellar la cámara interna del horno	Compuerta de guillotina	 Compuerta frontal	Compuerta superior

Aislar calor	Panel micro poroso	Manta de fibra cerámica	Placas de Silicato de Calcio
Contener y reflectar calor	Mortero refractario	Ladrillo refractario	Concreto refractario
Medir temperatura	Termocupla tipo S	Termocupla tipo K	Termocupla tipo N
Controlar la operación	Controlador programable	Arduino	PLC
Conmutar potencia	Rele de Estado Sólido (SSR)	Contactor electromecánico	Silicon Controlled Rectifier SCR
Proteger sistema eléctrico	Interruptor automático	Interruptor diferencial	Parada de emergencia
Detectar apertura	Fin de carrera mecánico	Interruptor de seguridad magnético	Sensor de proximidad inductivo

Encender y apagar	Controlador programable	Interruptor on/off	Pulsador on/off + parada de emergencia
Soportar sistemas	Carcasa HMI	Caja de control	Gabinete armado

Generación de conceptos

En esta sección se plantean configuraciones generales tomando en cuenta los conceptos expuestos en la carta morfológica anterior.

Concepto N°1:

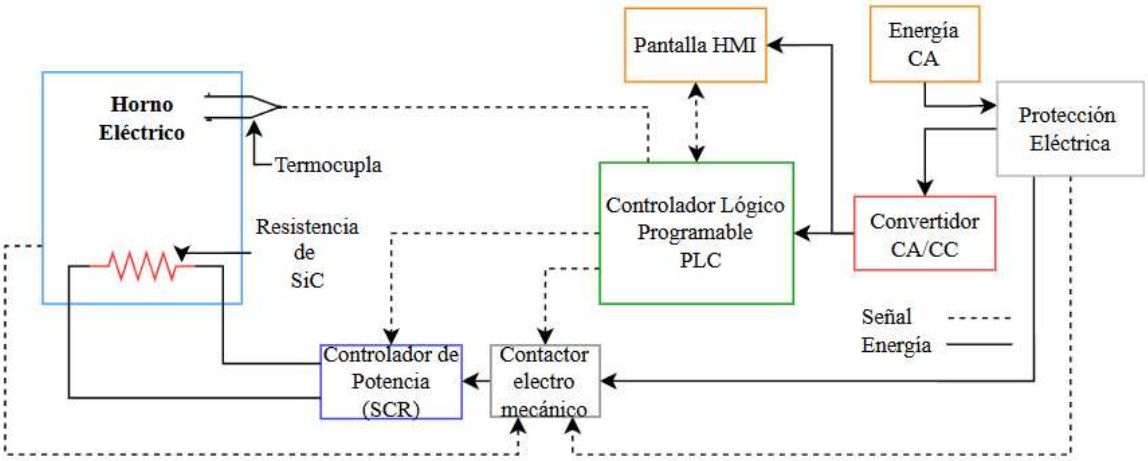


Figura 19. Concepto 1 Interfaz-PLC

La figura anterior representa la arquitectura de un sistema de control en lazo cerrado de nivel industrial. En este ciclo, la termocupla detecta la temperatura interna del horno y envía una señal analógica (milivoltios) directamente al Controlador Lógico Programable (PLC). El módulo de entradas analógicas interno del PLC es el encargado de filtrar los ruidos eléctricos y convertir esta señal a un valor digital discreto.

Posteriormente, el procesador del PLC compara la temperatura real leída con el perfil térmico (setpoint) que el usuario ha configurado a través de la Pantalla HMI. Al calcular la diferencia (error), el PLC ejecuta su algoritmo de control y envía una señal al Controlador de Potencia (SCR). Este tiristor modula de forma precisa el paso de la energía eléctrica hacia las resistencias de Carburo de Silicio (SiC), garantizando un arranque suave y compensando su desgaste. En paralelo, el contactor electromecánico actúa exclusivamente como un método de corte físico ante la activación del lazo de seguridad.

Si bien la integración de un PLC con un actuador SCR y elementos de SiC representa una arquitectura sumamente robusta y confiable a nivel industrial, constituye una solución tecnológicamente sobredimensionada y de alto costo para un equipo que gobierna principalmente una sola variable de proceso (temperatura). Por lo tanto, el elevado costo de implementación se vuelve un factor restrictivo fundamental al momento de evaluar la viabilidad de este concepto.

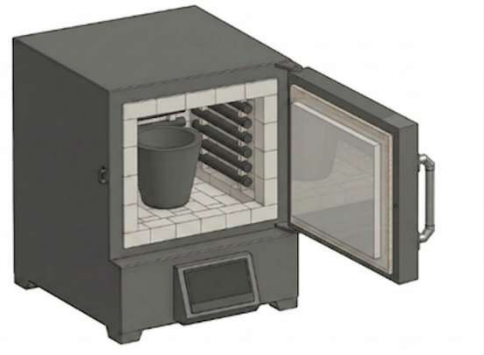


Figura 20. Concepto de horno compuerta frontal

El sistema de apertura estilo bisagra lateral permite una apertura y visualización visual directa sencilla, sin embargo, existe el riesgo de exposición a la radiación por parte del operador, además de posibles contactos con la superficie interna de la compuerta. Respecto a la extracción horizontal se requiere de mayor cuidado debido a la fuerza aplicada y posibilidad de tropezar

Concepto N°2:

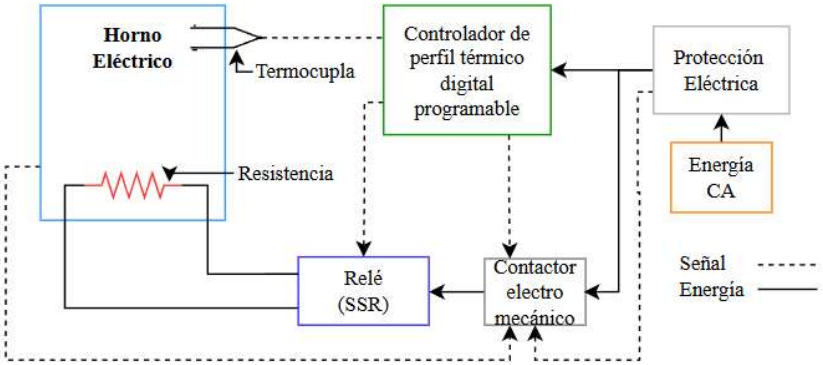


Figura 21. Concepto 2 Controlador digital programable

El suministro de Energía CA ingresa al sistema a través de un sistema de Protección Energética, la cual actúa como punto de entrada y resguardo para el conjunto. El diseño separa el circuito de potencia (líneas continuas) del circuito de control y realimentación (líneas segmentadas). En este esquema, el Controlador de perfil térmico procesa la información proveniente de la Termocupla y gestiona el Relé de Estado Solido (SSR) el cual conmuta la potencia necesaria hacia la Resistencia para cumplir con el perfil térmico programado. En caso de una falla electromecánica o del sistema de control, se activan medidas de seguridad como el contactor mecánico, automático eléctrico o parada de emergencia. Además, se plantea una medida de control/seguridad como puede ser un final de carrera, el cual se encargaría de quitar el suministro de energía a las resistencias si la compuerta se encuentra abierta.

Figura 22. Concepto de horno compuerta superior

El diseño de apertura con una tapa superior permite asegurar que el calor tienda a mantenerse dentro de la cámara por convección natural al abrir y permite una extracción vertical del crisol, lo que promueve una extracción más segura debido a que obliga a mantener una distancia definida de este sin tener que desplazarse con el componente caliente.

Concepto 3:

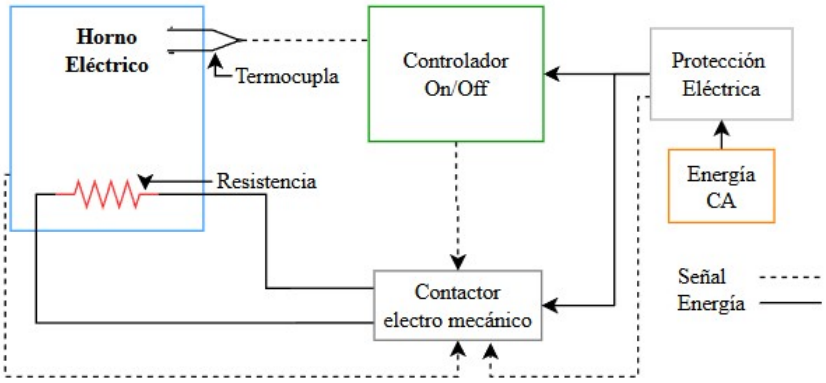


Figura 23. Concepto 3 controlador On/Off

Horno de resistencias cilíndrico (horno de pozo) con control digital on/off de termostato básico.

Esta opción ofrece un conjunto de elementos de control más simples y económicos que el concepto 2 los cuales consisten en un controlador digital de modalidad on-off conectado directamente a contactores electromecánicos pesados. Por otro lado, a diferencia de un controlador PID, este sistema no cuenta con un software predictivo ni control de rama de temperaturas, ya que simplemente inyecta el 100% de la potencia hasta llegar a la temperatura objetivo y se apaga de golpe.

Figura 24. Horno conceptual cilíndrico

La geometría de este horno promueve una distribución de calor uniforme sobre el crisol debido que posee la misma geometría que este, sin embargo, dicha geometría convierte la fabricación de este en una tarea más compleja tanto en materiales como maquinaria a ocupar por lo que es un factor importante a considerar tanto en fabricación como mantenimiento.

El sistema de suspensión de la compuerta permite la operación de esta de manera más segura reduciendo riesgos térmicos y de atrapamiento.

Concepto 4:

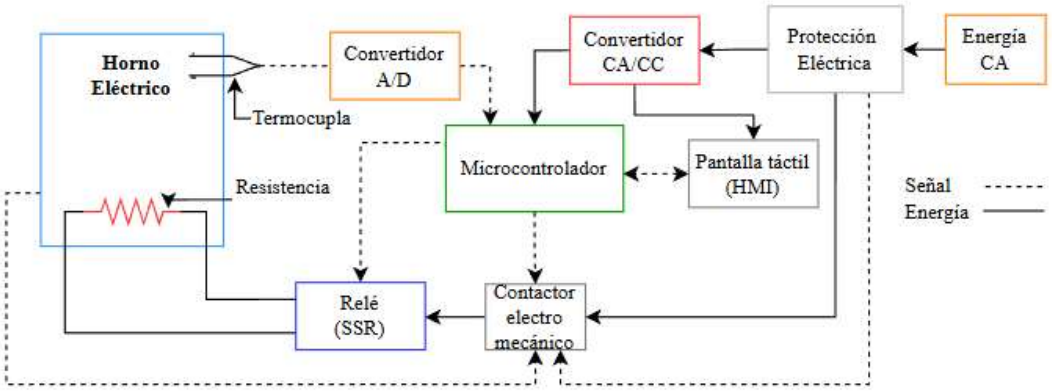


Figura 25. Opción 4 Microcontrolador

Horno de compuerta frontal de guillotina con microcontrolador de código abierto.

Este diseño consta de un sistema basado en un microcontrolador tipo Arduino, Raspberry o similar el cual sea capaz de ejecutar un script de control térmico programado y accionado mediante una pantalla táctil. Este sistema de control es altamente personalizable y versátil, sin embargo, cuenta con el riesgo de no estar certificado. Además, la alta potencia del conjunto eléctrico genera un ruido eléctrico severo lo cual puede congelar o reiniciar algunos microcontroladores del mercado.

Este sistema de control ofrece una solución relativamente económica y funcional dentro de los parámetros esperados sin embargo requiere de precisión y experticia en el área de mecatrónica.

Figura 26. Horno conceptual de guillotina

El diseño de puerta estilo guillotina permite una operación más segura de la compuerta del horno, ya que esta se abre con gran facilidad utilizando el mecanismo lateral dejando al operador fuera de cualquier riesgo térmico o de atrapamiento. Por otro lado, para la generación de calor se utilizan barras de Carburo de Silicio las cuales tiene una temperatura límite de 1600°C por lo que pueden trabajar con holgura a 1300 °C.

Propuestas de configuraciones de aislantes:

Para las configuraciones de aislantes se plantean las siguientes configuraciones por capas:

Primer concepto corresponde a una multicapa compuesta por ladrillo refractario, panel micro poroso y placa de Calcio-Silicato.

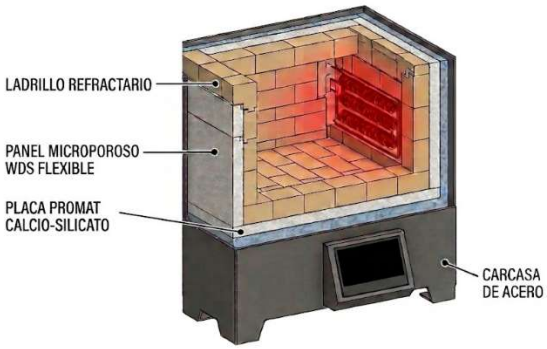


Figura 27. Concepto N°1 de aislación

El segundo concepto de aislación corresponde a una configuración de ladrillos y mantas cerámicas de alta y media densidad.

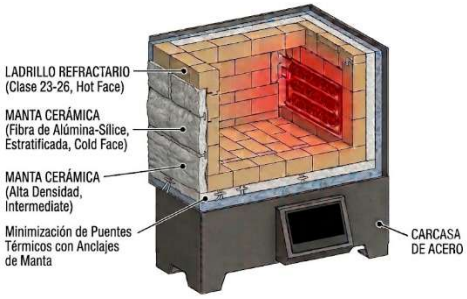


Figura 28. Concepto N°2 de aislación

El tercer concepto de aislantes corresponde a un conjunto cilíndrico de concreto refractario y mantas cerámicas de alta y media densidad.

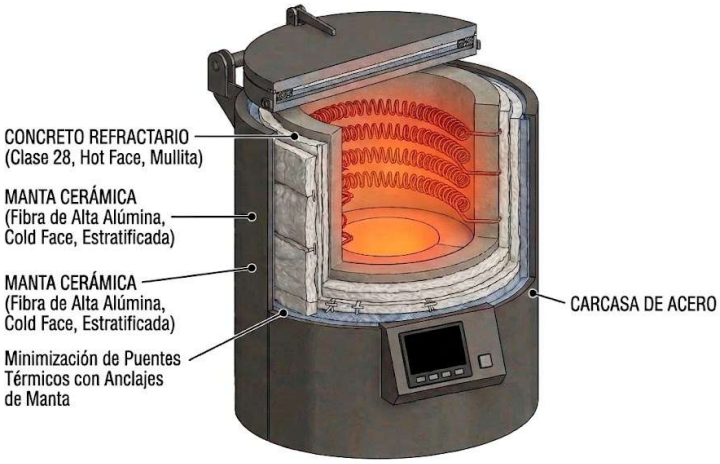


Figura 29. Concepto N°3 configuración de aislación

Selección de conceptos

Para la selección de conceptos se utiliza el método de pesos ponderados, ya que este permite visualizar de manera rápida que concepto es el que mejor se adecua a los objetivos, funciones y restricciones.

Método de selección de pesos ponderados

Ya definidos los 4 conceptos generados a partir del benchmarking, búsqueda de patentes y matriz QFD, se genera una tabla comparativa de pesos ponderados para determinar el diseño final a utilizar.

Tabla 11. Selección de conceptos

Criterios de Evaluación	Peso (%)	Concepto 1: PLC + SiC	Concepto 2: PID + Kanthal Ranurado	Concepto 3: On/Off + Kanthal Ranurado	Concepto 4: Arduino + Tubos Protectores
Seguridad térmica y Extracción	22%	4	4	4	5
Robustez y seguridad eléctrica	30%	5	5	3	2
Control de temperaturas automatizado	6%	5	5	2	3
Mantenimiento del calefactor	4%	2	5	5	3
Reparación estructural de cámara	4%	4	4	1	3
Interfaz intuitiva	2%	4	4	5	4
Rampa de temperaturas controlada	8%	5	5	1	4
Disponibilidad de piezas	2%	3	5	5	3
Costo de implementación	15%	1	4	5	3
Limpieza periódica y fácil	2%	5	3	3	5
Bajo costo de operación	5%	3	4	2	3
PUNTUACIÓN TOTAL	**100%**	**3.86**	**4.48**	**3.33**	**3.28**
ORDEN DE RELACIÓN		**2**	**1**	**3**	**4**

A partir del análisis cuantitativo desarrollado en la Matriz de Decisión Ponderada, se determina que el Concepto 2 (Horno de compuerta superior, controlador PID y resistencias Kanthal en ranuras) es la alternativa óptima para el desarrollo del proyecto, obteniendo la calificación más alta con 4,48 puntos sobre 5,00. Esta selección se fundamenta en su capacidad para satisfacer los requerimientos críticos de la matriz QFD, manteniendo un diseño enfocado en las prioridades especificadas por el cliente.

Desde la perspectiva de control y operación (16%), el uso de un sistema PID garantiza la precisión necesaria para ejecutar rampas térmicas automatizadas, superando ampliamente las limitaciones del sistema On/Off (Concepto 3) sin incurrir en los costos de un PLC industrial (Concepto 1) ni en la vulnerabilidad a ruidos eléctricos de una placa de desarrollo abierta (Concepto 4).

CAPÍTULO 4. DISEÑO DE CONFIGURACIÓN

Arquitectura del diseño

Habiendo definido los tipos de módulos que se utilizan en la selección de la arquitectura del diseño ubicada en la metodología, se procede a detallar los módulos necesarios para llevar a cabo el diseño del horno, detallando sus subfunciones y fundamento de estos.

Definición de la arquitectura

Para llevar a cabo una correcta definición de la arquitectura es necesario comenzar por los sistemas generales, los cuales como se menciona en la sección anterior serán distribuidos de manera modular y representados en la Tabla 12 donde se definen 4 módulos siendo estos de “Potencia y Seguridad”, “de Control”, “Térmico” y “Estructural”; las respectivas subfunciones de dichos módulos y las justificaciones técnicas de dichas clasificaciones.

Tabla 12. Módulos y subfunciones

Módulo	Subfunciones	Motivos (Justificación técnica)
Módulo de Potencia y Seguridad	- Interrumpir energía de fuerza por seguridad (Corte físico). - Modular potencia de calentamiento (Transmisión de corriente).	Agrupa toda la etapa de fuerza del tablero y su respectiva cadena de bloqueos. El SSR y el contactor trabajan en serie para permitir o interrumpir el flujo de alta corriente hacia las resistencias, asegurando que, ante cualquier falla o apertura de la compuerta, la energía se corte físicamente.
Módulo de Control	- Medir la temperatura interna de la cámara. - Ejecutar el perfil térmico (Rampas/Mesetas). -Mostrar temperatura de la cámara. -Mostrar parámetros operacionales.	Actúa como el cerebro del equipo y está compuesto exclusivamente por la electrónica de lectura y procesamiento lógico. La termocupla detecta la temperatura real y el PID ejecuta el algoritmo, enviando la señal de comando al SSR sin involucrarse en la transmisión de alta corriente.
Módulo Térmico	- Generar calor. - Aislar térmicamente la cámara. - Contener y soportar el crisol.	Contiene el transductor principal (resistencias Kanthal) y todos los elementos sometidos a los 1300 °C. Su diseño en conjunto busca minimizar las pérdidas por convección y conducción, maximizando la eficiencia de la transferencia de calor hacia el crisol.
Módulo Estructural	- Soportar el peso y dar rigidez mecánica al sistema. - Aislar espacialmente la electrónica.	Provee el chasis del equipo. Mantiene los componentes críticos alineados, soporta la gran masa del horno y aísla físicamente la zona de la cámara caliente del exterior.

Ya definidos loa módulos del sistema y sus respectivas subfunciones se procede a realizar un diagrama de la arquitectura del diseño diferenciando dichos módulos.

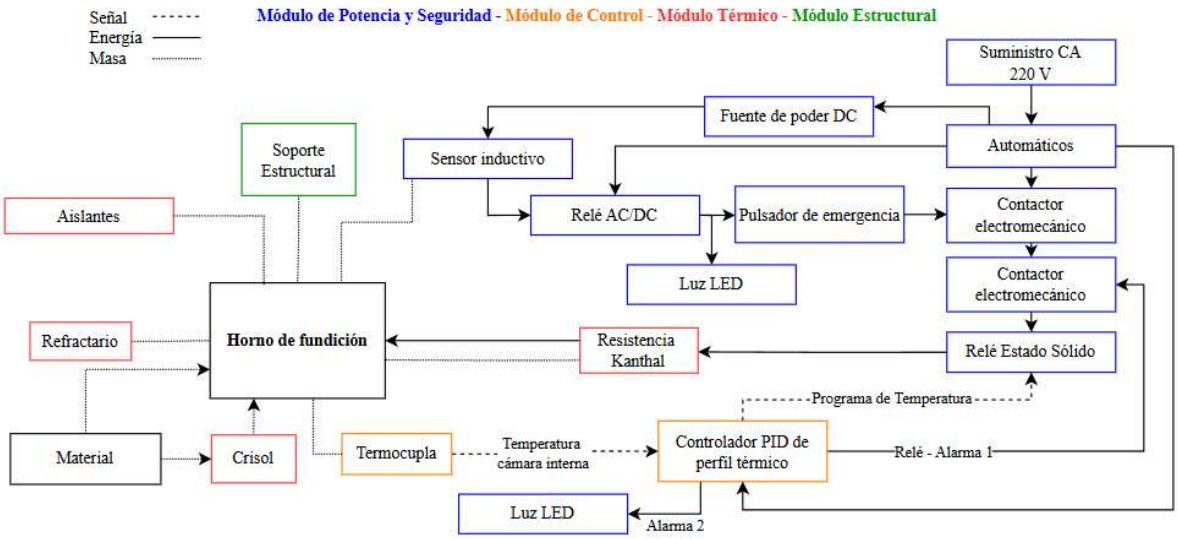


Figura 30. Arquitectura y módulos

Como se plantea en la Tabla 12 se tienen 4 módulos, donde el principal es el de potencia y seguridad, teniendo este múltiples elementos de seguridad para prevenir varias situaciones de fallas, como el caso de que el relé de estado sólido (SSR) presente una falla mecánica, que el controlador PID presente algún tipo de falla eléctrica, cierre incorrecto o apertura de la compuerta, perdida de integridad estructural del horno, cortocircuitos, sobrecargas del sistema y más. Para abordar o prevenir estas posibles fallas tenemos varias medidas de seguridad como el pulsador de emergencia que quita el suministro de energía a las resistencias mediante el uso de un contactor electromecánico, lo mismo aplica para el final de carrera instalado en el punto de cierre de la compuerta del horno, para el caso de que se quede accionado el SSR y no haya un operador en el área, la alarma 1 del controlador al detectar la alza de temperatura fuera de los parámetros especificados deja de energizar al segundo contactor electro mecánico y en paralelo por el canal de alarma 2 enciende una luz led catalogada como falla del sistema. Además, ante sobrecargas del sistema de potencia se integra el automático el cual corta el suministro eléctrico a todo el sistema.

Una vez definida la arquitectura del diseño, sus módulos y la configuración preliminar a diseñar, se genera un boceto inicial del conjunto.

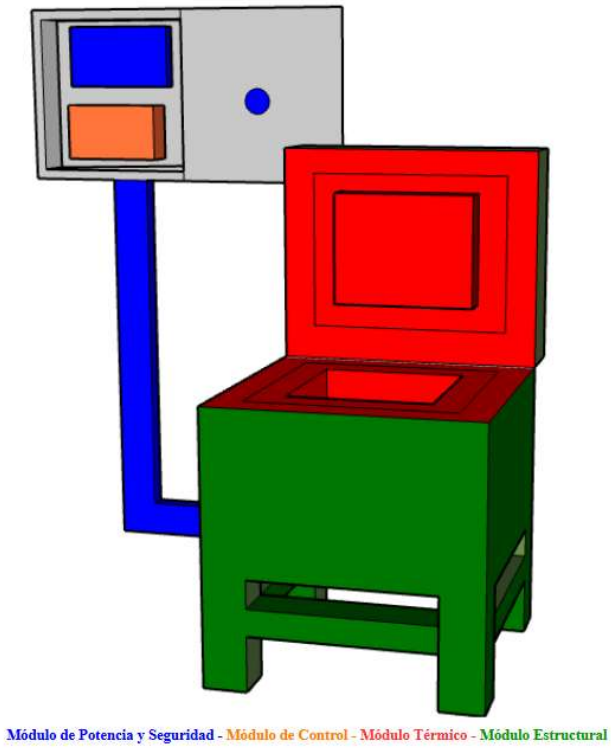


Figura 31. Distribución de la Arquitectura

Diseño de configuración

En esta sección del diseño se determinan materiales y configuraciones preliminares de acuerdo con los requerimientos, objetivos restricciones y materiales disponibles.

Criterios de selección y diseño

Mecanismos de control:

Para los mecanismos de control, se planificaron y seleccionaron en torno al controlador de temperaturas programable adquirido por el cliente, el cual satisface la mayoría de las funciones requeridas [21].

Para integrar el controlador al sistema se aplican los elementos de la Figura 21 donde en primer lugar se disponen de elementos de protección eléctrica como un automático, pulsador de emergencia y contactor electromecánico en caso de que exista una falla en la señal enviada al Relé de Estado Solido (SSR) el cual se encarga de alimentar a las resistencias eléctricas. Por otro lado, para la medición de temperaturas se consideran termocuplas tipo S, R y N.

Tabla 13. Tabla comparativa de Termocuplas

Tipo de Termocupla	**Aleación**	**T. Máx. Continua**	**T. Máx. Pico**	**Viabilidad para el Proyecto (1300 °C)**
Tipo S	Platino-10% Rodio / Platino	1450 °C	1600 °C	**Óptima.** Estándar industrial, larga vida útil.
Tipo R	Platino-13% Rodio / Platino	1480 °C	1600 °C	**Óptima.** Similar a Tipo S, excelente precisión.
Tipo N	Nicrosil / Nisil	1200 °C	1300 °C	**Marginal.** Solo para picos cortos, vida útil reducida.

Material aislante y/o refractario:

En lo que respecta a los materiales aislantes se evaluaron múltiples opciones según sus temperaturas de operación, proveedores, disponibilidad, precio y factibilidad de aplicación.

Tabla 14. Preselección de aislantes y refractarios

Material	**Función en el Sistema**	**T. Límite (Clasificación)**	**T. Operación Continua (Segura)**
Recubrimiento (Zircon Wash)	Sellado y barrera química	1650 °C	1550 °C
Mortero de Alta Alúmina refractario	Unión, sellado de ladrillos y barrera química	1600 °C	1500 °C

Ladrillo Aislante K26	Refractario y soporte mecánico	1426 °C	1350 °C
Ladrillo Aislante K23	Refractario y soporte mecánico	1260 °C	1100 °C
Ladrillos Refractarios Densos (45%-70%) AI203	Refractario y soporte mecánico	1460 °C – 1520 °C	1350 °C – 1450 °C
Tubos Refractarios Cerámicos	Soporte de resistencias y refractario	1300 °C	1250 °C
Papel de Fibra Cerámica	Juntas y sellos	1260 °C	1100 °C
Manta Fibra Cerámica 128 kg/m³ ZIRC	Aislante	1425 °C	1300 °C
Manta Fibra Cerámica 128 kg/m³	Aislante	1260 °C	1100 °C
Manta Fibra Cerámica 96 kg/m³	Aislante	1260 °C	1000 °C
Placa Fibra Cerámica	Aislante	1260 °C	1100 °C

Panel Micro poroso	Aislante	1100 °C	900 °C
Lana de Roca (Mineral)	Aislante	750 °C	600 °C
Pintura Aluminio (Altas temperaturas)	Barrera radiativa	650 °C	500 °C
Pintura Negro Mate (Altas temperaturas)	Disipador térmico	650 °C	500 °C

Estructura:

Al igual que con los módulos de control y energía, térmico y seguridad, para el módulo estructural se consideraron una variedad de elementos.

Tabla 15. Materiales estructurales propuestos

Tipo de Material	**Opciones Comerciales Evaluadas**	**Aplicación Potencial en el Proyecto**
Planchas Metálicas (Láminas)	- Acero al carbono - Acero galvanizado - Acero inoxidable 304	Fabricación de la carcasa.

Perfiles Estructurales Abiertos	- Perfil Ángulo - Perfil Pletina - Perfil en T	Armado del esqueleto base, marcos para la puerta, soportes de compresión y esquineros.
Perfiles Estructurales Cerrados	- Tubo Cuadrado - Tubo Rectangular	Refuerzos longitudinales de alta rigidez o construcción del pedestal/patas del horno.
Fijaciones Mecánicas	- Pernos hexagonales (Zincados Grado 5) - Pernos de Acero Inoxidable (Serie 300) - Remaches pop de acero	Uniones desmontables para tapas de mantenimiento, anclaje de bisagras y cierres.
Accesorios de Paso	- Tubos cerámicos de Alúmina pura - Tubos de Mullita - Bujes de esteatita	Aislamiento eléctrico y mecánico para el paso seguro del alambre Kanthal y la termocupla a través de la chapa.
Tratamientos Superficiales	- Pintura Alta Temperatura Aluminio - Pintura Alta Temperatura Negro Mate - Imprimante (Primer) epóxico	Modificación de la emisividad de las chapas metálicas (barrera radiativa o disipador térmico) y protección anticorrosiva.

Componentes normalizados adquiridos

Crisol:

En lo que respecta a la selección del crisol se utiliza el crisol especificado por el cliente, el cual posee las siguientes especificaciones.

Tabla 16. Especificaciones de Crisol de Carburo Silicio Corona Cadinhos [22]

Modelo	A	B	C	Aluminio	Cobre	Litros
A 10	197	162	110	4,3	14	2

La Tabla 16 especifica las dimensiones y composición del crisol a utilizar. Dichas dimensiones se visualizan en la Figura 32.

Figura 32. Crisol de Carburo de Silicio Corona Cadinhos [22]

De la misma manera por requerimiento del cliente y acorde a las matrices de decisión, se decide utilizar un controlador de temperatura en perfiles térmicos programables de la marca “veto”

Figura 33. Controlador térmico programable veto

Algunas de las características de este controlador son que posee capacidad de almacenamiento y operación de hasta 6 perfiles de 6 segmentos, 6 rampas y 6 mantenimientos y además posee

entradas para termocuplas tipo K, E, J, N, S, T, R y B. En la Figura 60 se encuentran el resto de las especificaciones técnicas.

En lo que respecta a los ladrillos refractarios, el cliente posee acceso a un stock de ladrillos ANKER 30 los cuales se clasifican como tipo M98 acorde a la norma ISO 10081-2 lo que lo certifica como apto para la aplicación deseada de 1300°C y fundición de metales no ferrosos.

Figura 34 Stock de ladrillos refractarios Anker 30

En caso de no ser suficiente el stock actual y de que Aceros AZA no puede volver a proveer ladrillos a la UTFSM se considera la utilización de ladrillos K-26 los cuales se componen principalmente de Sílice-Alúmina y tienen una temperatura de operación de hasta 1430°C [23].

Ambos ladrillos comparten medidas de 9” x 4 ½” x 3”.

Figura 35. Ladrillo refractario K-26 [23]

Diseño paramétrico

Cálculos de resistencias para hornos:

Al utilizar elementos calefactores de resistencia eléctrica es necesario determinar el material, forma y configuración que satisfacera de mejor manera los requisitos de calentamiento específicos. El enfoque general es comenzar con la temperatura y potencia de funcionamiento requeridas, el voltaje disponible y el espacio para los elementos de calentamiento. Luego se selecciona un material y tipo de elemento adecuados y se realizan los cálculos de los parámetros del elemento [24].

Carga superficial del elemento: [24]

La carga superficial máxima admisible disminuye con el aumento de la temperatura del horno y depende de factores como la temperatura máxima del elemento, la deformación del elemento y los límites de corriente.

La carga superficial afecta el diseño del elemento de dos maneras opuestas. Si se reduce la carga superficial, se requiere un elemento más grande y costoso; sin embargo, dicho elemento experimenta un consumo de material más lento, lo que resulta en una vida útil más larga. El objetivo es seleccionar una carga superficial que proporcione un equilibrio óptimo entre la vida útil y el coste del elemento.

La carga superficial de un elemento calefactor, p, es igual a su potencia, P, dividida por su área superficial, A:

$$p_{resistencia} = \frac{P}{A_{superficial}} \qquad (1)$$

Cargas superficiales máximas recomendadas para las aleaciones Kanthal® A-1, Kanthal® AF y Kanthal® APM en hornos industriales [24].

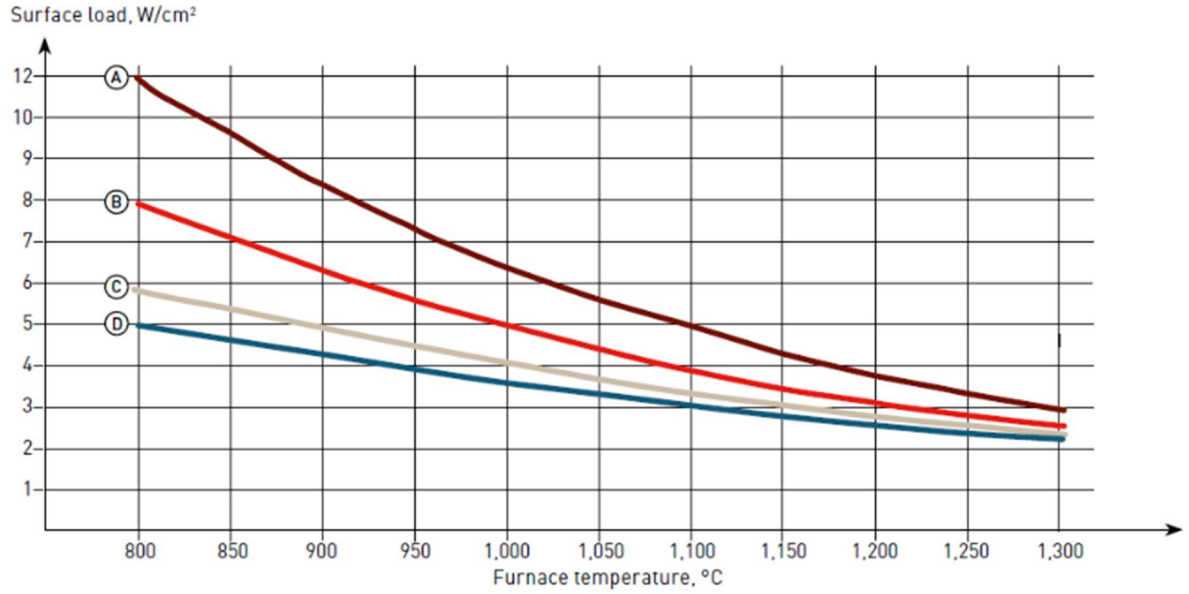


Figura 36. Carga superficial v/s temperatura del horno [24]

Nota: El diagrama es válido para control con tiristores. Para control con contactores se deben elegir cargas de superficie más bajas (aproximadamente - 20%).

Las simbologías "A, B, C, D" de la Figura 36 se detallan en la siguiente figura:

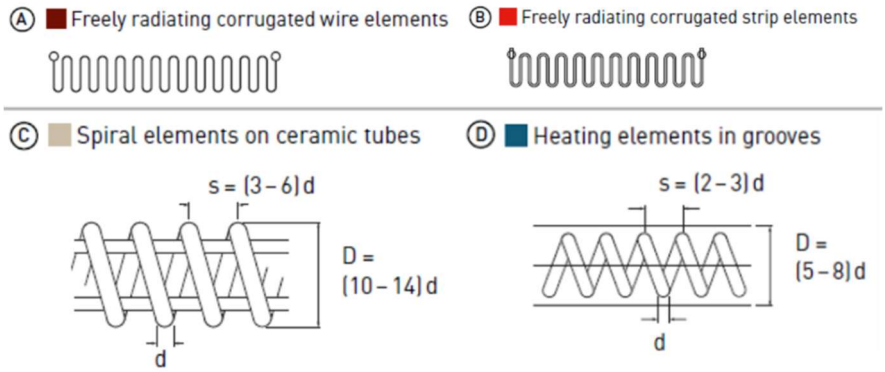


Figura 37. Tipos de elementos ensayados [24]

Los elementos de la Figura 37 poseen las siguientes condiciones de diseño:

Elemento A (hilo grueso) y B (pletina):

- **Espesor mínimo de la pletina:** 2,5 milímetros.
- **Diámetro mínimo del hilo:** 5 milímetros
- **Paso mínimo:** 50 mm con longitud máxima de onda y carga superficial máxima
- **Longitud máxima de onda recomendada:**
    - **< 900°C:** 300 mm.
    - **1.000°C:** 250 mm.
    - **1.100°C:** 200 mm.
    - **1.200°C:** 150 mm.
    - **1.300°C:** 100 mm.

Para diámetros de hilo más finos y espesores de pletina más pequeños, se deben elegir cargas superficiales más bajas y longitudes de onda más cortas para evitar la deformación del elemento y la consiguiente menor vida útil del elemento.

Elemento C: Elemento de hilo sobre tubo cerámico.

- **Diámetro mínimo del hilo:** 3 milímetros.

Elemento D: Elemento de hilo y pletina en ranuras.

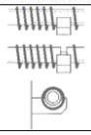
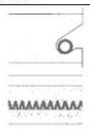
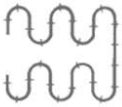
- **Diámetro mínimo del hilo:** 3 milímetros.
- **Espesor mínimo de la pletina:** 2 milímetros.

Selección de la configuración:

Para la selección de la configuración, Kanthal provee la siguiente información:

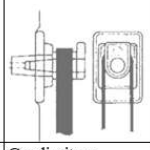
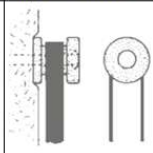
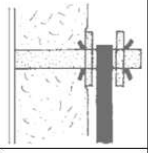
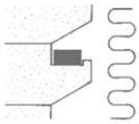
Para resistencias de hilo:

Tabla 17. Especificaciones técnicas de configuración Kanthal elementos de hilo [25]

	ELEMENTOS DE ALAMBRE					
Sistemas de elementos	Espiral	Espiral	Puercoespín	Varilla doblada	Corrugado	En bucle
Soportes	Tubos cerámicos	Ranuras	Tubos cerámicos	Varillas metálicas	Grapas metálicas	Tubos cerámicos
						
Material	Silimanita	Chamota grado 28	Silimanita	Kanthal® APM	Clavos Kanthal® en forma de U	Silimanita
Temperatura máx. del horno, °C	1300	1250	800	1300	1300	1300
Carga máx. de pared a temperatura de horno de 1000°C, kW/m²	40	35	-	50	50	60
Carga máx. superficial a temperatura de horno de 1000°C, W/cm²	3-4	3-4	-	5-6	3-6	5-6
Diámetro del alambre, d, mm	2,0-6,5	2,0-5,0	1,0-6,5	>5,0	2,0-5,0	>5,0
Espesor de la tira, t, mm	-	-	-	-	-	-
Ancho de la tira, w, mm	-	-	-	-	-	-
Diámetro exterior de la bobina, D, mm	12-14 d	5-6 d	-	-	-	-
Longitud máx. del bucle a temperatura de horno de 1000°C, mm	-	-	-	250	100	250
Paso mín. a la longitud máx. del bucle, mm	3d	2d	3d	40	40	40

Para resistencias configuradas como tiras se tiene la siguiente tabla:

Tabla 18. Especificaciones técnicas de configuraciones Kanthal elementos de tiras [25]

	ELEMENTOS DE TIRA			
Sistemas de elementos	Corrugado profundo	Corrugado profundo	Corrugado profundo	Corrugado
Soportes	Fijaciones de copa cerámica	Bujes cerámicos	Tubos cerámicos	Ranuras
				
Material	Cordierita o mullita	Cordierita o mullita	Silimanita	Chamota grado 28
Temperatura máx. del horno, °C	1300	1300	1300	1300
Carga máx. de pared a temperatura de horno de 1000°C, kW/m²	60	60	60	20-40
Carga máx. superficial a temperatura de horno de 1000°C, W/cm²	5-6	5-6	5-6	3-5
Diámetro del alambre, d, mm	-	-	-	-
Espesor de la tira, t, mm	2,0-3,0	2,0-3,0	2,0-3,0	1,5-3,0
Ancho de la tira, w, mm	8-12 t	8-12 t	8-12 t	8-12 t
Diámetro exterior de la bobina, D, mm	-	-	-	-
Longitud máx. del bucle a temperatura de horno de 1000°C, mm	250	250	250	2-3 w
Paso mín. a la longitud máx. del bucle, mm	50	50	50	1,5 w

Selección del material:

En lo que respecta la vida útil de cada material disponible, podemos ver la vida útil de estos a distintas temperaturas en la Figura 38.

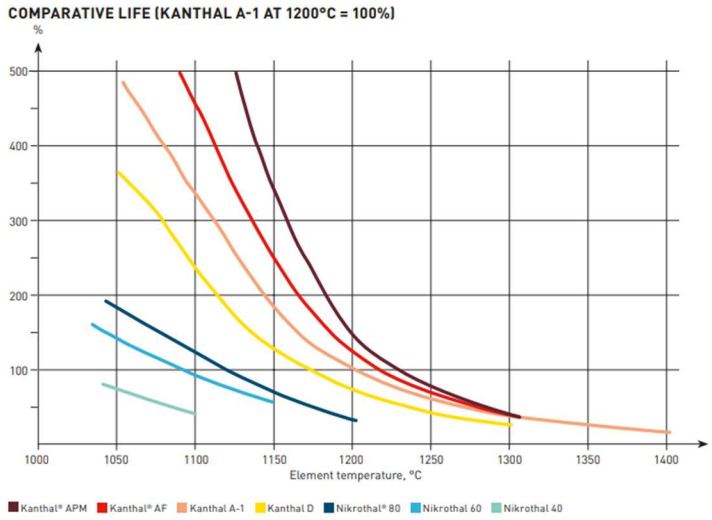


Figura 38. Comparación de vida útil de resistencias respecto a las Kanthal A-1 [25]

Principales ventajas de las resistencias Kanthal: [25]

- Mayores temperaturas máximas (1425°C) en comparación con Nikrothal (1250°C).
- Vida útil hasta cuatro veces mayor.
- Mayor carga superficial.
- Mayor resistividad.
- Menor densidad.
- Sin desprendimiento de óxido (escamas), lo cual evita la contaminación de la carga y del horno, además de prevenir cortocircuitos o fallas en los elementos y quemadores de gas.

Las ventajas anteriores se ven reflejadas en la Tabla 19 donde se comparan ambas aleaciones con parámetros operacionales iguales de 3 elementos de 40 kW y 380 V.

Tabla 19. Comparación NIÑROTHAL V/S Kanthal [25]

Variable	NIKROTHAL®	KANTHAL®
Temperatura del horno, °C	1000	1000
Temperatura del elemento	1068	1106
Resistencia en caliente, R_w	3,61	3,61
Factor de temperatura, C_t	1,05	1,05
Resistencia en frío, R_{20}	3,44	3,41
Diámetro del alambre, mm	5,5	5,5
Carga superficial, W/cm^2	3,09	3,98
Longitud de alambre (3 elementos), m	224,9	174,6
Peso del alambre (3 elementos), kg	44,4	29,6

Además, de la tabla se rescata que al usar las resistencias Kanthal el conjunto disminuye su peso en un 33%.

Tabla 20. Temperaturas máximas permisibles [25]

	KANTHAL® A-1 y APM °C	KANTHAL AF °C	KANTHAL D °C	NIKROTHAL® 80 y 70° °C	NIKROTHAL 60 °C	NIKROTHAL 40 °C
Oxidante:						
Aire, seco	1400[a)]	1300	1300	1200[d)]	1150	1100
Aire, húmedo	1200	1200	1200	1150	1100	1050
Neutral:						
N_2, Nitrógeno[b)]	1200	1250	1150	1250	1200	1150

Ar, Argón	1400[a)]	1300	1300	1250	1200	1150
Exotérmica:						
10 CO, 15H_2, 5CO_2, 70 N_2	1150	1150	1100	1100[d)]	1100	1100
Reductora:						
Endotérmica:						
20 CO, 40 H_2, 40 N_2	1050	1050	1000	1100[d)]	1100	1000
H_2, Hidrógeno	1400[a)]	1300	1300	1250	1200	1150
Amoníaco disociado:						
75 H_2, 25 N_2	1200	1200	1100	1250	1200	1150
Vacío:						
10^{-3} seco	1150	1200	1100	1000	900	900

a) Máximo 1425 °C para KANTHAL APM
b) Los valores más altos son válidos para materiales pre-oxidados.
c) Existe riesgo de formación de podredumbre verde o corrosión interna en atmósferas carburantes. Usar KANTHAL AF o NIKROTHAL 70.
d)1250 °C para NIKROTHAL 70.
e) El uso de amoníaco disociado que aún contiene amoníaco sin disociar, disminuye la temperatura máxima de trabajo permitida.

De los análisis anteriores, los requerimientos del diseño definidos y la Tabla 20 se determina de que las resistencias a utilizar deben ser Kanthal, por lo que de forma preliminar se filtran las opciones a 4 (D, AF, A1 y APM). Sin embargo, ya que se especifica una temperatura operacional de 1300 °C las resistencias AF y D estarían operando en el límite superior especificado por el fabricante por lo que se descartan ambas, quedando finalmente las opciones Kanthal A-1 y APM.

Comparación entre Kanthal APM y A-1

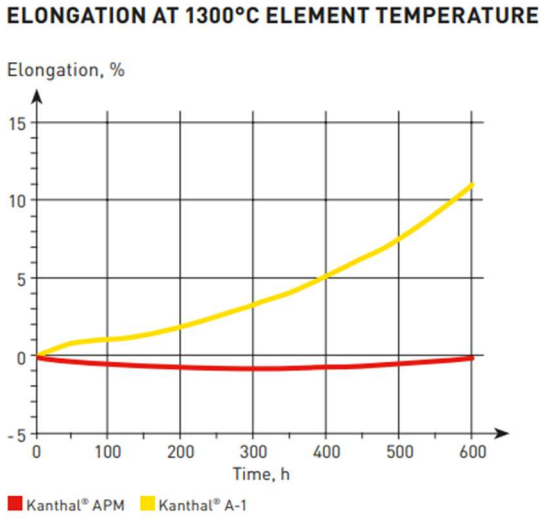


Figura 39. Comparativa de elongación de resistencias APM y A-1 [25]

De la Figura 39 se observa que las resistencias A-1 al operar durante varias horas se vuelven más propensas a elongarse, donde a las primeras 50 horas de operación continua su elongación ronda el 1% aumentando hasta un 10 % cerca de las 580 horas continuas. Por otro lado, las resistencias APM presentan un comportamiento opuesto, estas en cierto rango de horas de operación se contraen, propiedad favorable si se piensa instalar la resistencia de manera más libre o con menos soportes.

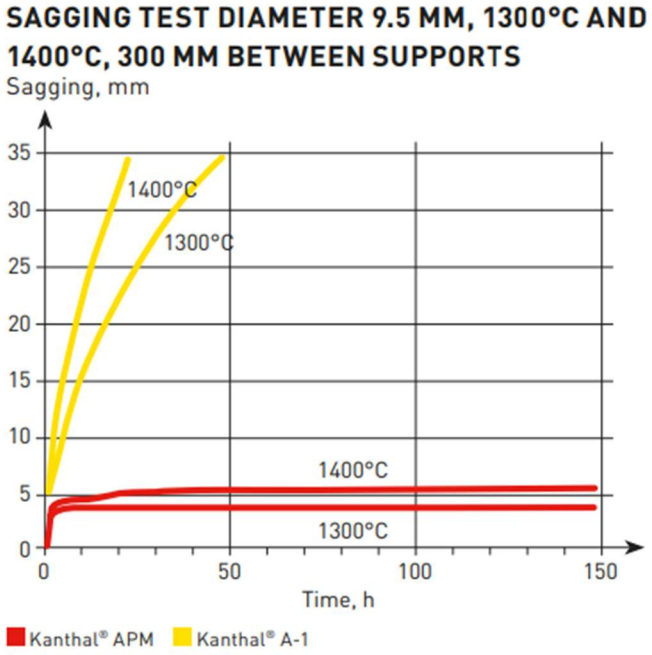


Figura 40. Comparativa de pandeo entre Kanthal APM y A-1 [25]

En la Figura 40 se observa un gráfico comparativo de las tendencias de pandeo o deformación de la resistencia al colocar está colgando entre soportes. En dicho gráfico se observa una clara superioridad mecánica de las APM a altas temperaturas, lo cual es un factor a considerar en la selección de materiales definitiva.

Principales ventajas de las resistencias Kanthal APM: [25]

- Mayor estabilidad térmica.
- Necesitan menor cantidad de soportes.
- Bajo cambio de resistencia térmica (envejecimiento).
- Mayor vida útil.
- Buena protección en la mayoría de las atmósferas, especialmente las corrosivas.

- Ausencia de descascarillado (scalling) e impurezas.
- Vida útil del elemento mayor.

Ventajas de resistencias Kanthal A-1 sobre APM:

- Disponibilidad de compra al por menor.
- Bajo costo (relativo).
- Amplia variedad de formatos y dimensiones.
- Mayor maleabilidad en frío.
- Menor fragilidad de manipulación

Cálculo de resistencia: [25]

$$\boldsymbol{d} = \frac{\mathbf{1}}{K_d}\sqrt[3]{I^2\frac{\rho C_t}{P_s}} \qquad (2)$$

El cálculo del diámetro depende de propiedades dadas por el fabricante como ρ, C_t, P_s dependientes de la temperatura, K_d una constante dependiente de las unidades utilizadas y la corriente I definida por el usuario o fabricante.

Para el cálculo de la corriente se utiliza la siguiente ecuación:

$$I = \frac{P}{V} \qquad (3)$$

Ya definida la corriente necesaria, se procede a calcular el diámetro de la resistencia, debido a que el diseño considera el uso de tristores se pueden trabajar valores de P_s cercanos a la curva de la Figura 36, sin embargo, para asegurar una mayor vida útil de la resistencia, usaremos una carga superficial de 1,7 W/cm^2. Para el cálculo del diámetro y corriente a utilizar, se buscó un punto medio entre consumo eléctrico, disponibilidad en el mercado, durabilidad, recomendaciones por parte del fabricante y propiedades mecánicas, obteniendo el siguiente cálculo.

$$\boldsymbol{d} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2{,}91}}\sqrt[3]{\mathbf{24}^2\frac{\mathbf{1{,}45*1{,}04}}{\mathbf{1{,}7}}} = \mathbf{2{,}75}\ [\boldsymbol{mm}] \qquad (4)$$

Con el diámetro de la resistencia (2,75 mm) se procede a calcular el largo “l” de la resistencia.

$$R_{20} = \frac{R_T}{C_t} = \frac{U^2}{PC_t} \qquad (5)$$

$$R_{20/m} = \frac{4\rho}{\pi d^2} \qquad (6)$$

$$l = \frac{R_{20}}{R_{20/m}} = \mathbf{36,1}\ [m] \qquad (7)$$

Luego para definir las dimensiones de la bobina se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$w = \frac{l}{\pi(D-d)} \qquad (8)$$

Donde el diámetro D de la bobina se determina en la Figura 37, considerando D como 6 veces d obtenemos un valor de D = 16,5 mm lo que conlleva a una w = 835.8 [vueltas].

La variable L_w representa la longitud de la bobina cerrada.

$$L_w = wd = 2299\ [mm] \qquad (9)$$

Una vez calculada la longitud de la bobina cerrada se procede a calcular la distancia entre espiras.

$$S = 2{,}5 * d = 6{,}875\ [mm] \qquad (10)$$

Ya calculadas las distancias entre espiras y L_w se procede a determinar el largo total de la bobina a colocar dentro del horno.

$$L_{efectivo} = \frac{S * L_w}{d} = 5746[mm] \qquad (11)$$

De la ecuación anterior se determina que el diseño de la cámara interna propuesto debe contar con un perímetro de 5.746 [mm] para alojar la resistencia en sus paredes internas.

Transferencia de calor

$$\dot{W}_{horno} = v * I \qquad (12)$$

$$\dot{Q}_{util} = W_{Horno} - \dot{Q}_{perdidas} \qquad (13)$$

Espesor de aislante

Para el cálculo del espesor necesario de aislante mínimo para tener una superficie externa de relativa baja temperatura se utiliza el modelo de Transferencia de Calor de la Figura 41 donde el calor que absorbe la pared por medio de la radiación y se transmite al exterior se considera como "$Q_{Pérdidas}$".

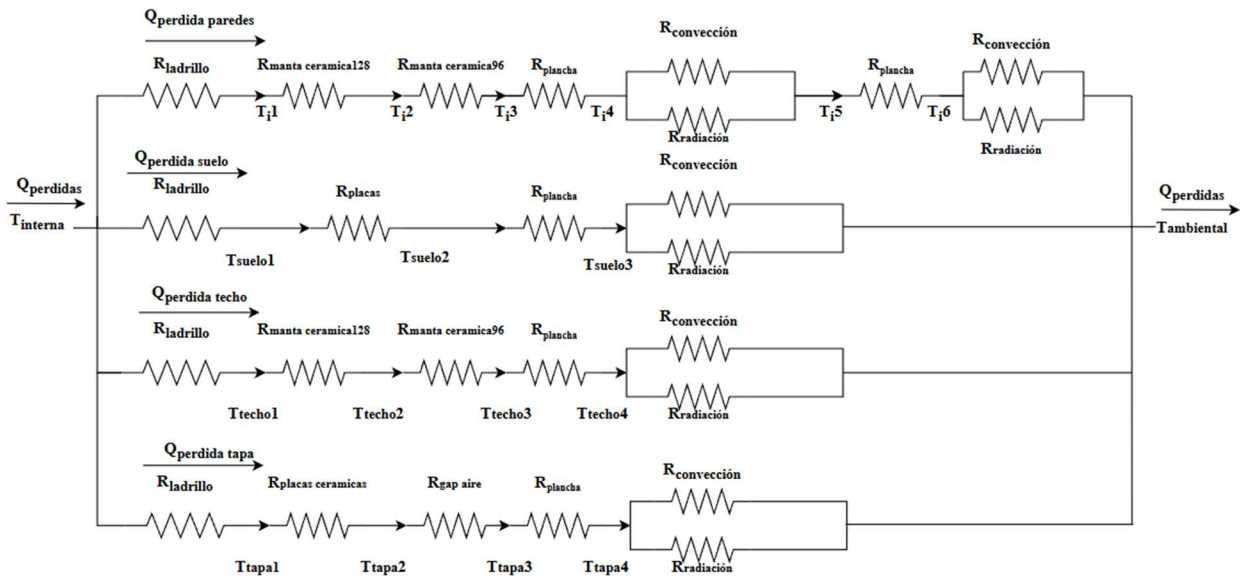


Figura 41. Transferencia de calor en pared aislante red de resistencias

De la Figura 41 se obtiene la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{perdidas} = \frac{t_{interna} - t_{ambiental}}{R_{total}} \qquad (14)$$

Siendo R_{total} la resistencia equivalente del sistema. Compuesta por las sumas de las resistencias individuales "Rcond", "Rconv", "Rrad" y "Requivalente":

$$\boldsymbol{R_{cond}} = \frac{L}{K_{aislante} * A} \qquad (15)$$

$$\boldsymbol{R_{conv}} = \frac{1}{h_{convección} * A} \qquad (16)$$

$$\boldsymbol{R_{rad}} = \frac{1-\epsilon}{\epsilon * A} \qquad (17)$$

Debido a la configuración del conjunto de aislantes y las altas temperaturas, no podemos despreciar la transferencia de calor por medio de la radiación, por lo cual utilizamos la siguiente ecuación para determinar el h_{rad}.

$$h_{rad} = \sigma({t_{i,j}}^2 - {t_{i,j+1}}^2)\left[\frac{t_{i,j}-t_{i,j+1}}{\frac{1}{\epsilon_{i,j}}+\frac{1}{\varepsilon_{i,j+1}}-1}\right] \qquad (18)$$

Una vez planteada la ecuación para determinar el h_{rad} procedemos a plantear las ecuaciones de convección natural entre las planchas de acero:

$$t_{conv,n} = \frac{t_{i,j}-t_{i,j+1}}{2} \qquad (19)$$

Donde con la temperatura media del espacio ("gap") entre las placas se obtienen las propiedades de conductividad térmica del aire para así conseguir el coeficiente de convección.

$$h_{conv,n} = \frac{1*k_{aire(t_{conv,n})}}{d_{gap}} \qquad (20)$$

Habiendo planteado ambos coeficientes estos se agrupan en un coeficiente de transferencia de calor combinado.

$$\boldsymbol{h_{comb} = h_{conv} + h_{rad}} \qquad (21)$$

Obteniendo así la resistencia equivalente en el espacio ("gap").

$$\boldsymbol{R_{comb} = \frac{1}{h_{comb}*A}} \qquad (22)$$

Para determinar la transferencia de calor por convección y radiación hacia el exterior se utiliza un procedimiento similar aplicando ciertas suposiciones.

$$h_{rad,amb(i,j)} = \sigma({t_{i,j}}^2 - {t_{ambiental}}^2)\left[\frac{t_{i,j}-t_{ambiental}}{\frac{1}{\epsilon_{i,j}}}\right] \qquad (23)$$

Para los valores de convección en las superficies externas se utilizó el rango de valores mencionados en la literatura tomando valores conservadores de 5 W/m^2K para paredes verticales y 3 W/m^2K para horizontales. [14]

De acuerdo con las proposiciones anteriores, la Figura 41 se puede reducir a las siguientes combinaciones de resistencias térmicas en serie:

Donde la "R_{pared}" se aplica 4 veces debido a las 4 paredes laterales del horno

$$R_{pared} = R_{cond\ lad} + R_{cond\ manta128} + R_{cond\ manta96} + R_{cond\ plancha} + R_{comb} + R_{cond\ plancha} + R_{comb} \quad (24)$$

$$R_{Techo} = R_{cond\ lad} + R_{cond\ manta128} + R_{cond\ manta96} + R_{cond\ plancha} + R_{comb} \quad (25)$$

$$R_{Tapa} = R_{cond\ lad} + R_{cond\ placas} + R_{comb} + R_{cond\ plancha} + R_{comb} \quad (26)$$

$$R_{Suelo} = R_{cond\ lad} + R_{cond\ manta128} + R_{cond\ manta96} + R_{cond\ plancha} + R_{comb} \quad (27)$$

Luego en base a las configuraciones del diseño (Figura 41) y las ecuaciones anteriores se calcula la resistencia total:

$$R_{total} = \frac{1}{\sum \frac{1}{R_{pared,i}} + \frac{1}{R_{Suelo}} + \frac{1}{R_{Techo}} + \frac{1}{R_{Tapa}}} \quad (28)$$

Teniendo el R_{total} del sistema podemos calcular el "$Q_{pérdidas}$".

$$Q_{pérdidas} = \frac{T_{interna} - T_{amb}}{R_{total}} \quad (29)$$

Para determinar las temperaturas en los nodos de las resistencias de la Figura 41 primero debemos calcular los calores que pasan a través de las distintas paredes y para eso se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$Q_{pared,i} = \frac{T_{interna} - T_{ambiental}}{R_{pared,i}} \quad (30)$$

$$Q_{Techo} = \frac{T_{interna} - T_{ambiental}}{R_{Techo}} \quad (31)$$

$$Q_{Tapa} = \frac{T_{interna} - T_{ambiental}}{R_{Tapa}} \quad (32)$$

$$Q_{Suelo} = \frac{T_{interna} - T_{ambiental}}{R_{Suelo}} \quad (33)$$

Una vez determinados los calores de pérdidas individuales se calculan las temperaturas.

$$Q_{pared,i} = \frac{T_{interna} - T_{i,1}}{R_{cond\ lad}} \quad (34)$$

Para el cálculo de temperaturas en las mantas con el fin de afinar los cálculos se aplicaron múltiples nodos cada 25 mm de aislante (espesor correspondiente al entregado por el fabricante). Además, como los valores de conductividad térmica varían acorde a la temperatura se realizan múltiples iteraciones hasta llegar a los valores de conductividad adecuados para cada sección.

$$Q_{pared,i} = \frac{T_{i,1} - T_{i,128A}}{R_{cond\ manta\ 128(1)}} \qquad (35)$$

$$Q_{pared,i} = \frac{T_{i,128A} - T_{i,2}}{R_{cond\ manta\ 128(2)}} \qquad (36)$$

La capa de aislante de 128 kg/m^3 cumple la función adicional de disminuir la temperatura a un valor menor a 1100 °C para aumentar la vida útil y eficiencia de las mantas de 96 kg/m^3.

$$Q_{pared,i} = \frac{T_{i,2} - T_{i,96A}}{R_{cond\ manta\ 96(1)}} \qquad (37)$$

$$Q_{pared,i} = \frac{T_{i,96A} - T_{i,96B}}{R_{cond\ manta\ 96(2)}} \qquad (38)$$

$$Q_{pared,i} = \frac{T_{i,96B} - T_{i,96C}}{R_{cond\ manta\ 96(3)}} \qquad (39)$$

$$Q_{pared,i} = \frac{T_{i,96C} - T_{i,3}}{R_{cond\ manta\ 96(4)}} \qquad (40)$$

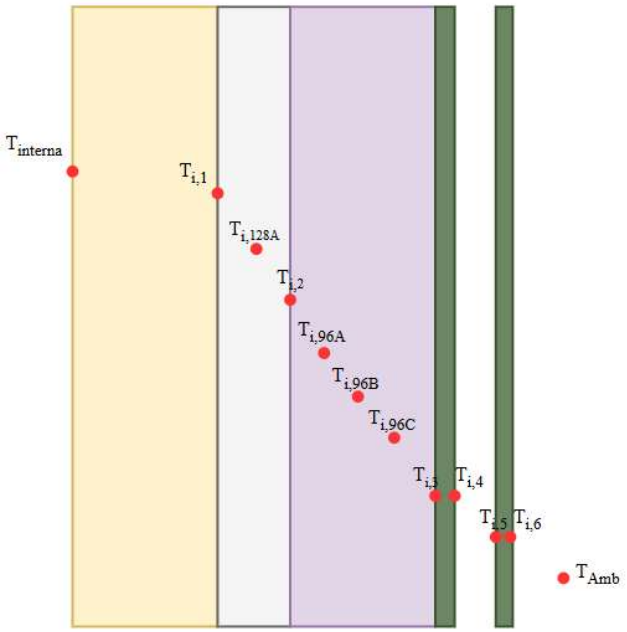


Figura 42. Nodos de temperaturas en paredes aislantes laterales

Una vez planteadas las ecuaciones de los distintos aislantes, se plantean las ecuaciones de las planchas que contienen a dichos aislantes.

$$Q_{pared,i} = \frac{T_{i,3} - T_{i,4}}{R_{cond\ plancha}} \qquad (41)$$

El diseño considera una distancia entre placas "dgap" la cual utilizando la capa de aire que queda entre ellas como un aislante natural. Además, debido a que el fenómeno de transferencia de calor por radiación es predominante en dicha área se considera en los cálculos el uso de pintura de baja emisividad en las caras interiores aumentando así la retención del calor.

$$Q_{pared,i} = \frac{T_{i,4} - T_{i,5}}{R_{comb\ plancha}} \qquad (42)$$

Para las paredes exteriores con el propósito de disminuir la temperatura superficial, se utiliza pintura de alta emisividad.

$$Q_{pared,i} = \frac{T_{i,5} - T_{i,6}}{R_{cond\ plancha}} \qquad (43)$$

$$Q_{pared,i} = \frac{T_{i,6} - T_{i,comb}}{R_{i,comb\ plancha}} \qquad (44)$$

Los resultados de los nodos de temperaturas en las paredes son:

Tabla 21. Temperaturas nodales paredes aislantes laterales

Variables	Valor
$T_{i,1}$	1146 [K]
$T_{i,128A}$	1066 [K]
$T_{i,2}$	975 [K]
$T_{i,96A}$	877[K]
$T_{i,96B}$	766 [K]
$T_{i,96C}$	635 [K]
$T_{i,3}$	465 [K]
$T_{i,4}$	465 [K]
$T_{i,5}$	329 [K]
$T_{i,6}$	329 [K]

De la Tabla 21 se observa que la temperatura exterior es de 56°C, la cual se considera segura.

Parara los nodos de calor del techo se aplica el mismo procedimiento, separándolo en la sección "techo" y "tapa".

Se considera una primera capa de aislantes usando ladrillos refractarios por el borde corto de 3”.

$$Q_{Techo} = \frac{T_{interna} - T_{T,ladrillo}}{R_{T,cond\ lad}} \qquad (45)$$

Luego una doble capa de mantas de densidad de 128, siendo la primera de Zirc y ambas de 25 mm de espesor.

$$Q_{Techo} = \frac{T_{T,ladrillo} - T_{T,manta128,1}}{R_{T,cond\ manta\ 128,1}} \qquad (46)$$

$$Q_{Techo} = \frac{T_{T,manta128,1} - T_{T,manta128,2}}{R_{T,cond\ manta\ 128,2}} \qquad (47)$$

Luego se tienen 4 mantas de densidad 96.

$$Q_{Techo} = \frac{T_{T,manta128,2} - T_{T,manta96,1}}{R_{T,cond\ manta\ 96,1}} \qquad (48)$$

$$Q_{Techo} = \frac{T_{T,manta96,1} - T_{T,manta96,2}}{R_{T,cond\ manta\ 96,2}} \qquad (49)$$

$$Q_{Techo} = \frac{T_{T,manta96,2} - T_{T,manta96,3}}{R_{T,cond\ manta\ 96,3}} \qquad (50)$$

$$Q_{Techo} = \frac{T_{T,manta96,3} - T_{T,manta96,4}}{R_{T,cond\ manta\ 96,4}} \qquad (51)$$

Por último se tiene la plancha de acero que conduce el calor y lo disipa por medio de radiación y convección.

$$Q_{Techo} = \frac{T_{T,manta96,4} - T_{T,plancha}}{R_{T,cond\ plancha}} \qquad (52)$$

$$Q_{Techo} = \frac{T_{T,plancha} - T_{amb}}{R_{T,comb\ plancha}} \qquad (53)$$

Dichos nodos y configuraciones se representan en la siguiente figura, donde el espacio libre al centro corresponde a la zona donde se ubica la “tapa” superior.

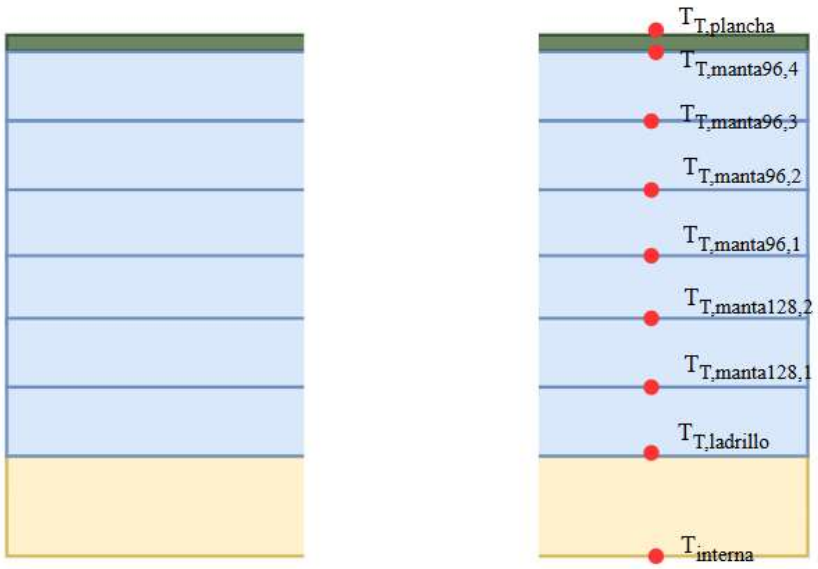


Figura 43. Nodos de temperatura techo (sin tapa)

Los valores de temperatura obtenidos en dichas secciones son:

Tabla 22. Nodos de temperatura techo

Variables	Valor
$T_{T,ladrillo}$	1301 [K]
$T_{T,manta128,1}$	1160 [K]
$T_{T,manta128,2}$	1018 [K]
$T_{T,manta96,1}$	874 [K]
$T_{T,manta96,2}$	709 [K]
$T_{T,manta96,3}$	524 [K]
$T_{T,manta96,4}$	334 [K]
$T_{T,plancha}$	334 [K]

De la Tabla 22 se observa que la temperatura superficial del techo del horno es de 60.85°C.

Para los cálculos térmicos de la tapa superior se ocupan las siguientes ecuaciones:

Donde al igual que en el techo la primera capa de ladrillos tiene 3'' de espesor.

$$Q_{Tapa} = \frac{T_{interna} - T_{Tapa,ladrillo}}{R_{Tapa,cond\ lad}} \qquad (54)$$

Debido a la configuración de la tapa se utilizan placas de silicato con una densidad de 320 en vez de mantas, siendo estas 7 capas de 25 mm.

$$Q_{Tapa} = \frac{T_{Tapa,ladrillo} - T_{Tapa,placa,1}}{R_{Tapa,cond\ placa,1}} \qquad (55)$$

$$Q_{Tapa} = \frac{T_{Tapa,placa,1} - T_{Tapa,placa,2}}{R_{Tapa,cond\ placa,2}} \qquad (56)$$

$$Q_{Tapa} = \frac{T_{Tapa,placa,2} - T_{Tapa,placa,3}}{R_{Tapa,cond\ placa,3}} \qquad (57)$$

$$Q_{Tapa} = \frac{T_{Tapa,placa,3} - T_{Tapa,placa,4}}{R_{Tapa,cond\ placa,4}} \qquad (58)$$

$$Q_{Tapa} = \frac{T_{Tapa,placa,4} - T_{Tapa,placa,5}}{R_{Tapa,cond\ placa,5}} \qquad (59)$$

$$Q_{Tapa} = \frac{T_{Tapa,placa,5} - T_{Tapa,placa,6}}{R_{Tapa,cond\ placa,6}} \qquad (60)$$

$$Q_{Tapa} = \frac{T_{Tapa,placa,6} - T_{Tapa,placa,7}}{R_{Tapa,cond\ placa,7}} \qquad (61)$$

Dentro de la misma tapa superior existe un espacio de aire que beneficia la aislación y retención de calor.

$$Q_{Tapa} = \frac{T_{Tapa,placa,7} - T_{Tapa,gap}}{R_{Tapa,comb,gap}} \qquad (62)$$

Por último tenemos la plancha de acero la cual conduce y disipa el calor por medio de convección y radiación.

$$Q_{Tapa} = \frac{T_{Tapa,gap} - T_{Tapa,plancha}}{R_{Tapa,cond\ plancha}} \qquad (63)$$

$$Q_{Tapa} = \frac{T_{Tapa,plancha} - T_{amb}}{R_{Tapa,comb}} \qquad (64)$$

En la siguiente figura se muestra la configuración simplificada de la tapa superior, con sus respectivos nodos de temperatura.

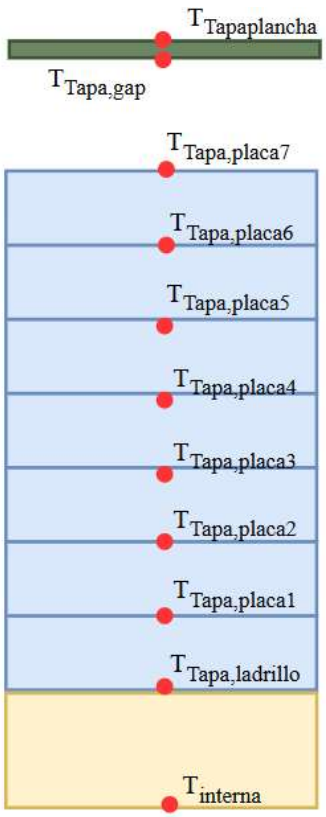


Figura 44. Nodos de temperatura tapa superior

En la Tabla 23 se muestran los valores de temperaturas obtenidos para la tapa superior.

Tabla 23. Nodos de temperatura tapa superior

Variables	Valor
$T_{Tapa,ladrillo}$	1495 [K]
$T_{Tapa,placa1}$	1413 [K]
$T_{Tapa,placa2}$	1315 [K]
$T_{Tapa,placa3}$	1205 [K]
$T_{Tapa,placa4}$	1065 [K]
$T_{Tapa,placa5}$	901 [K]
$T_{Tapa,placa6}$	704 [K]
$T_{Tapa,placa7}$	458 [K]
$T_{Tapa,gap}$	320 [K]
$T_{s,plancha}$	320 [K]

De la tabla anterior se evidencia que la temperatura exterior de la tapa es de 46.85°C.

En lo que respecta a los cálculos térmicos y configuración del suelo se tiene lo siguiente:

Para la configuración del suelo se considera una capa de ladrillo refractario, ubicados sobre el borde más corto (3’’).

$$Q_{Suelo} = \frac{T_{interna} - T_{S,lad}}{R_{cond\ lad,s}} \qquad (65)$$

Debido a que el suelo soporta el peso de la cámara interna no es posible utilizar mantas debido a que estas se comprimen, por lo que se aplican placas de fibra cerámica las cuales poseen mayor densidad y una temperatura de operación máxima de 1260 °C.

$$Q_{Suelo} = \frac{T_{S,lad} - T_{S,placa1}}{R_{placa1,s}} \qquad (66)$$

$$Q_{Suelo} = \frac{T_{S,placa1} - T_{S,placa2}}{R_{cond\ placa,2,s}} \qquad (67)$$

$$Q_{Suelo} = \frac{T_{S,placa2} - T_{S,placa3}}{R_{cond\ placa,3,s}} \qquad (68)$$

$$Q_{Suelo} = \frac{T_{S,placa3} - T_{S,placa4}}{R_{cond\ placa,4,s}} \qquad (69)$$

$$Q_{Suelo} = \frac{T_{S,placa4} - T_{S,placa5}}{R_{cond\ placa,5,s}} \qquad (70)$$

Por último, las placas están montadas sobre una plancha de acero, la cual conduce el calor y luego lo disipa.

$$Q_{Suelo} = \frac{T_{S,placa5} - T_{S,plancha}}{R_{cond\ plancha,s}} \qquad (71)$$

$$Q_{Suelo} = \frac{T_{S,plancha} - T_{amb}}{R_{comb,s}} \qquad (72)$$

En la Figura 45 se representa la configuración y los nodos de temperatura del conjunto de aislantes de la base.

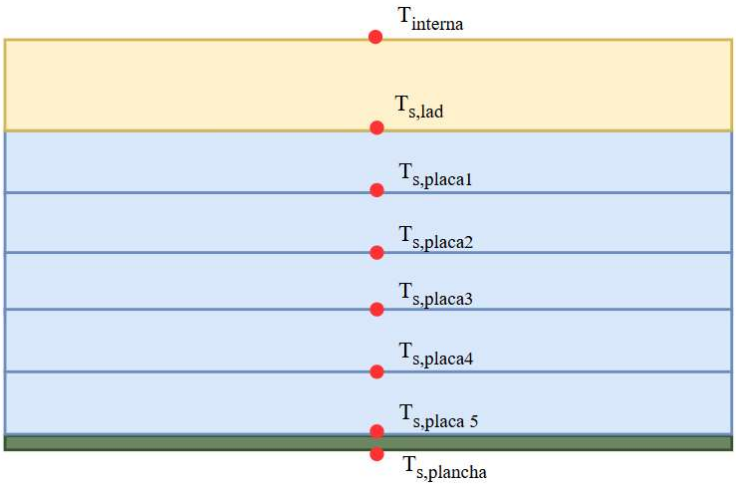


Figura 45. Nodos de temperaturas en la base

Dichos nodos tienen los siguientes valores de temperatura:

Tabla 24. Temperaturas nodales de la base

Variables	Valor
$T_{s,lad}$	1463 [K]
$T_{s,placa1}$	1333 [K]
$T_{s,placa2}$	1174 [K]
$T_{s,placa3}$	970 [K]
$T_{s,placa4}$	683 [K]
$T_{s,placa5}$	326 [K]
$T_{s,plancha}$	326 [K]

De la tabla anterior se aprecia que la temperatura de la plancha inferior que soporta al horno tiene una temperatura de 52.85°C, el cual es un valor conservador ya que no considera las disipaciones de calor generadas por el armazón que soportara al horno, el cual al estar fabricado con perfiles que actuaran como aletas.

Con las resistencias ya calculadas, podemos determinar las pérdidas del sistema.

$$Q_{Pérdidas} = \sum_1^4 Q_{Pared,i} + Q_{Techo} + Q_{Suelo} \qquad (73)$$

Las pérdidas del sistema son:

Tabla 25. Pérdidas de calor

Variables	Valor
$Q_{Pared,i}$	147,9 [W]
Q_{Techo}	226,9 [W]
Q_{Tapa}	47,9 [W]
Q_{Suelo}	189,5 [W]
$Q_{Pérdidas}$	1056[W]

Comparando el valor de $Q_{Pérdidas}$ con la potencia del horno (Tabla 28) se obtiene lo siguiente:

$$\eta = \frac{W_{Horno} - Q_{Pérdidas}}{W_{Horno}} = 78{,}2\% \qquad (74)$$

Del valor anterior se deduce que la configuración de las paredes y aislantes del horno son capaces de retener cerca del 78,2% del calor.

Cálculo de rampa de temperatura máxima:

Para calcular la rampa de temperatura máxima se utilizan variables como la potencia del horno, volumen de la cámara interna, densidad del aire y más variables.

$$C_{th} = \sum_{i=1}^{n}(m_i * Cp_i) \qquad (75)$$

Donde m_i es la masa, Cp_i el calor específico de cada componente y C_{th} la capacidad térmica total.

$$C_{th} = 43 + 521{,}8 + 13075 = 13640{,}8\ J/K \qquad (76)$$

Los valores corresponden al aire, ladrillos refractarios y resistencias respectivamente.

Con la potencia del horno, pérdidas de calor y capacidad térmica total es posible calcular la tasa de calentamiento.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W_{horno} - Q_{perdidas}}{C_{th}} = \frac{5280 - Q_{perdidas}}{13640{,}8}\ [\frac{K}{s}] \qquad (77)$$

Suponiendo una rampa de temperatura inicial sin pérdidas de calor se tiene una rampa máxima teórica de 23 °C/min**.** A medida que el horno aumenta su temperatura este valor irá disminuyendo.

Cálculo de deflexión máxima.

El conjunto barra, compuerta y armazón interactúan de la siguiente manera:

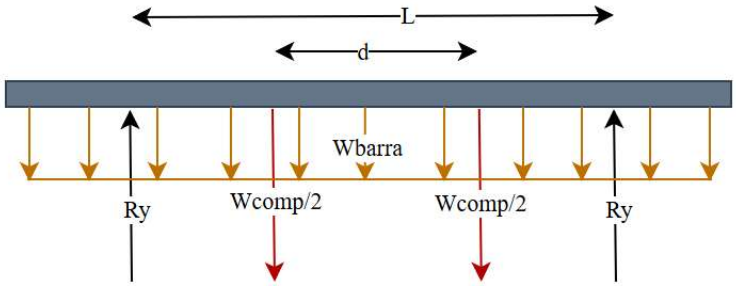


Figura 46. Diagrama de cuerpo libre barra, compuerta y armazón

Primero calculamos el momento de inercia.

$$\boldsymbol{I_x = \frac{\pi}{64}(D_{ext}^4 - D_{int}^4)} \qquad (78)$$

Donde para este caso:

- D_{ext} = 0,03175 m (diámetro exterior).
- t = 0,002 m (espesor).
- $D_{int} = D_{ext} - 2t$ = 0,02775 m.
- $I_x = 2{,}077 \times 10^{-8} m^4$.

Luego la distancia más cercana hasta el punto de carga se calcula con:

$$\boldsymbol{a} = \frac{\boldsymbol{L-d}}{\boldsymbol{2}} \qquad (79)$$

Donde para este caso:

a = 0,341 m (distancia entre punto de carga y reacción).

L = 0,982 m (separación entre apoyos).

d = 0,3 m (separación entre los agarres).

Acorde al diagrama de cuerpo libre, calculamos la carga distribuida del peso de la barra:

$$w_{barra} = \frac{m_{barra}*9{,}81}{L_{barra}} = 28{,}45\ N/m \qquad (80)$$

Con los cálculos anteriores se procede a calcular la deflexión máxima.

$$\delta_{max} = \frac{F*a}{24\ E*I_x}(3L^2 - 4a^2) + \frac{5*w_{barra}*L_{barra}{}^4}{384*E*I_x} = 1{,}80\ mm \qquad (81)$$

Donde:

F = W_{comp}/2 = 207,5 [N].

E = 200 x 10^9 [Pa].

Acorde a la norma NCh 427 el límite de deflexión admisible para vigas que soportan peso sin sufrir daño permanente ni comprometer visualmente la estructura es de L/250, lo que equivale a 3,92 mm por lo que el diseño esta 2,17 veces sobre lo especificado por la norma.

Esfuerzo máximo y factor de seguridad

Para el cálculo del factor de seguridad del esfuerzo por flexión primero debemos determinar el esfuerzo máximo que soportara la barra.

$$\sigma_{max} = \frac{F*a*c}{I_x} = 56{,}69\ MPa \qquad (82)$$

Donde para este caso:

a = 0,341 m (distancia entre punto de carga y reacción).

F = W_{comp}/2 = 207,5 [N].

I_x = 2,077 X $10^{-8}$$m^4$.

$c = D_{ext}/2$

Ya calculado el esfuerzo máximo, se divide este por el esfuerzo de fluencia del material para determinar el factor de seguridad.

$$F.S = \left(\frac{56{,}69}{250}\right)^{-1} = 4{,}41\ [-] \qquad (83)$$

El valor de 4,41 asegura la integridad de la barra ante la carga de la compuerta.

CAPÍTULO 5. DISEÑO DE DETALLE

Selección de componentes normalizados

Para la selección final de componentes normalizados se tomaron en consideración múltiples factores como disponibilidad en el mercado local, precio, calidad, dimensiones y compatibilidad.

Tabla 26. Lista de componentes normalizados

Imagen	Componente	Unidades	Valor Unitario CLP	Valor Total CLP	Detalles	Proveedor
	Ladrillo refractario K26	50	2.900	**145.000**	9"x4,5"x3"	ICCH
	Manta de Fibra Cerámica128kg/m^3, ZIRC	1	75.000	**150.000**	7620x610x25 mm, t_{max} = 1400 °C	ICCH
	Manta de Fibra Cerámica 128kg/m3,	1	40.000	**80.000**	7620x610x25 mm	ICCH
	Manta de Fibra Cerámica 96 kg/m3	3	35.000	**210.000**	7 620x 610x25 mm	ICCH
	Placa de Fibra Cerámica 320 kg/m^3	5	35.000	**210.000**	1200 x 610 x 25 mm	ICCH
	Plancha Acero 3mm	1	68.490	**68.490**	1000x3000 mm	Proladam

	Plancha Acero 1.5mm	2	29.990	**59.980**	1000x3000 mm	Proladam
	Perfil Tubular Acero laminado en frío	1	10.190	**10.190**	⌀1 1/4" x 2 mm x 6000mm	Imperial
	Resistencia Kanthal A-1	2	103.530	**207.060**	2.75 mm x 1 kg, 2 kg en total	Fabrestel
	Pletina Acero 3mm	1	8.490	**8.490**	6000 x 50 mm	Mimbral
	Termocupla Tipo S TET810	1	1.029.800	**1.029.800**	Termocupla Vaina Cerámica, conexión 2 hilos, Diámetro del Bulbo: 10mm	Indutécnica
	Cable termopares tipo S	10	2.580	**25.800**	Cubierta de FIBRA / MALLA calibre 2 x 0.22 mm	Indutécnica
	Perfil cuadrado acero	7	18.490	**129.430**	6 m 50 x 2 mm	Mimbral
	Controlador de Temperatura programable	1	392.826	**392.826**	6 perfiles de 6 segmentos, 6 rampas y 6 mantenimientos, entradas T/C tipo K, E, J, N, S, T, R	Veto
	Interruptor Automático	1	4.200	**4.200**	2x32A Curva C 6kA CNC YCB9-63	Electromall
	Automático	1	1.960	**1.960**	4A	Electromall
	Cable RV-K	10	4.311	**43.110**	3x6 mm2 0.6/1KV	Gobantes

	Pulsador de emergencia	1	3.011	**3.011**	660Vca 50Hz ,10A.	Electromall
	Luz Piloto LED	2	1.700	**3.400**	22mm 220V Rojo IP54	Electromall
	Gabinete Metálico	1	99.990	**99.990**	1 puerta 700x500x250 7035 IP66	Electromall
	Riel DIN Acero	2	2.390	**4.780**	36x6.7mmx1 m	SODIMAC
	Mortero refractario 25 KG	1	87.500	**87.500**	Húmedo PLACIBAR UG de ALUMINA	ICCH
	Pintura alta emisividad	2	14.990	**29.980**	Esmalte resistente a altas T°, 400°C permanente y 500°C intermitente. Fácil aplicación	easy
	Pintura spray aluminio Marson	3	14.990	**44.970**	Esmalte sintético formulado en base a resinas de silicona temperaturas de 400°C permanentes y 550°C en forma intermitente	easy
	Sensor de proximidad inductivo	1	33.622	**33.622**	D6235045 Hasta 4 mm, salida PNP, 600 Hz	Veto
	Relé de 8 Pines	1	5.442	**5.442**	24vdc Con Base, 2no + 2nc, 10a	Mercado libre

	Fuente de Poder 75W	1	36.990	**36.990**	3.2A 220VAC-24VDC	Electromall
	Contactor electromecánico	2	16.490	**32.980**	Contactor Trifásico CJX2s 32A Bobina 220V 1NO 1NC	Electromall
	Disipador de calor para SSR	1	9.497	**9.497**	Compatible con SSR Veto	Veto
	Pasta térmica Arctic	1	2.871	**2.871**	Mx-4 De Alto Rendimiento Jeringa 4gr Color Negro	Mercado libre
	Ventilador cooler	2	9.990	**19.980**	120x120x38 Mm 220 V	Mercado libre
	Relé de estado sólido SSR	1	36.709	**36.709**	40 AA 250 VAC	Veto
	Electrodo 6011	3	2.370	**7110**	1/8’’ - 3,2mm bolsa 1kg hemic	Imperial
	Electrodo 6013	3	4.990	**14.970**	3/32’’ 1 kg	easy
			Total	**2.995.138**		

Costos como consumo eléctrico, horas hombre y adquisición de los productos corren bajo el presupuesto del cliente. Debido a la variabilidad e incertidumbre, dichos costos quedan excluidos de la tabla anterior, sin embargo, no exceden el presupuesto total definido por el cliente (4.000.000 CLP).

Diseño final

Como se menciona en el capítulo 4 se utiliza un diseño modular, el cual permite acceder e intercambiar componentes críticos como mantas, placas y cámara interna.

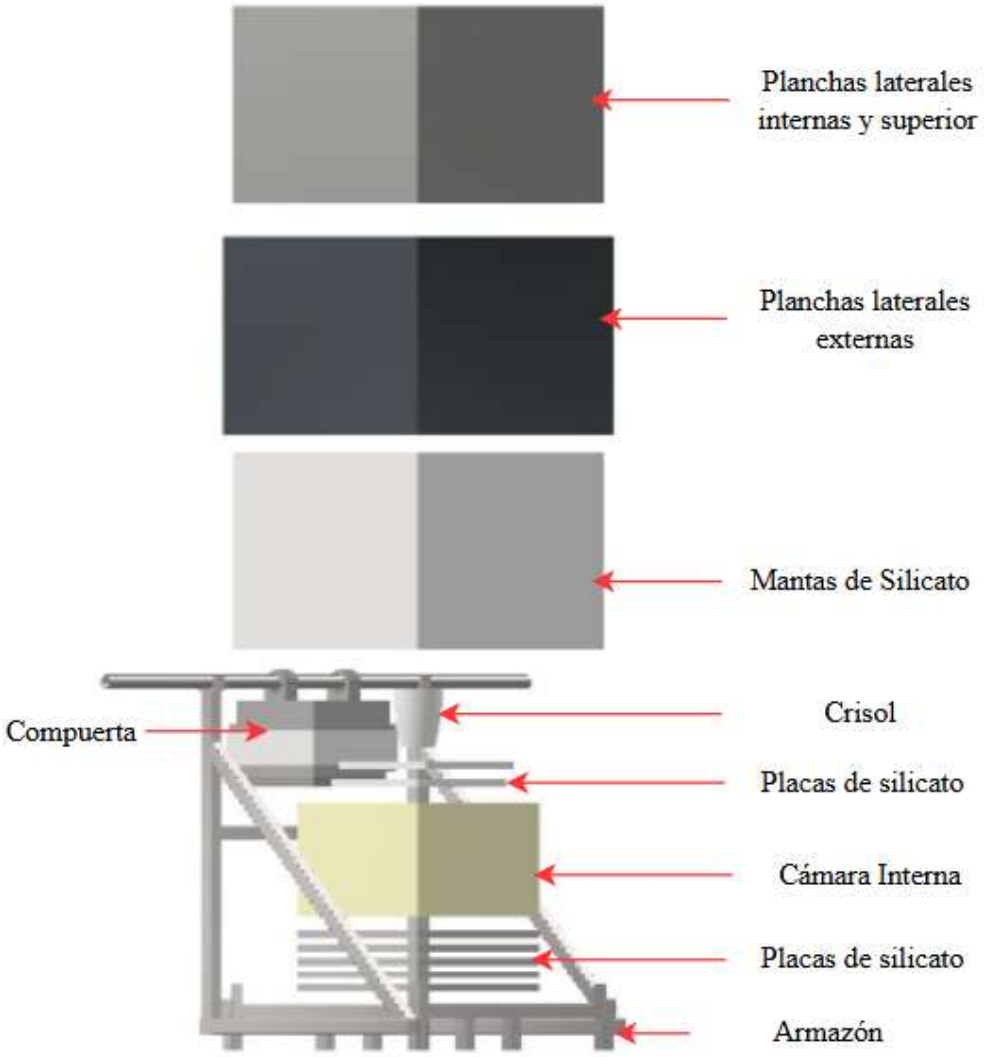


Figura 47. Vista explosionada Horno

Una vez ensambladas todas las partes evidenciadas en la

Figura 47, el conjunto se ve de la siguiente manera:

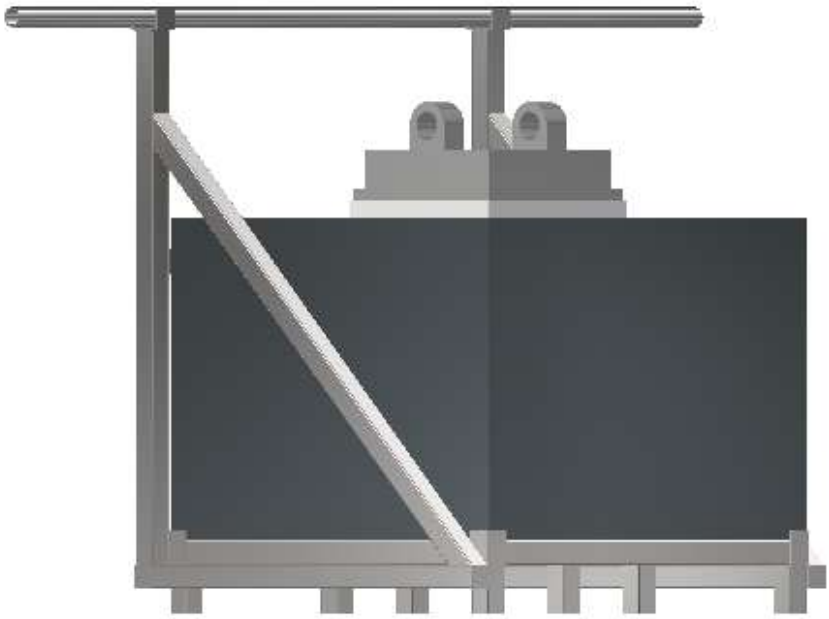


Figura 48. Horno cerrado

Para la apertura de la cámara interna se utiliza una barra de acero, con la cual 2 operadores levantan la compuerta utilizando una barra de acero laminado en frío y la montan en el rack posterior como se aprecia en la Figura 49.

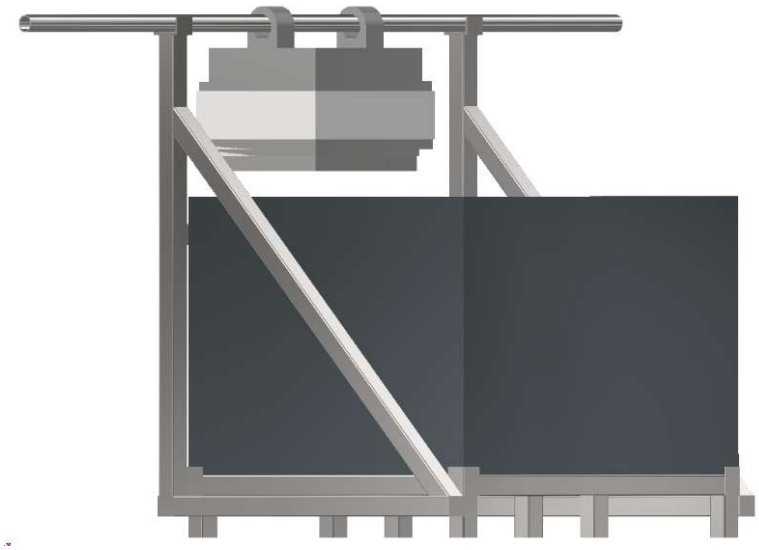


Figura 49. Horno abierto vista isométrica

Una vez que se cuelga la compuerta en el rack posterior, es posible extraer el crisol o material de trabajo mediante la utilización de herramientas como pinzas.

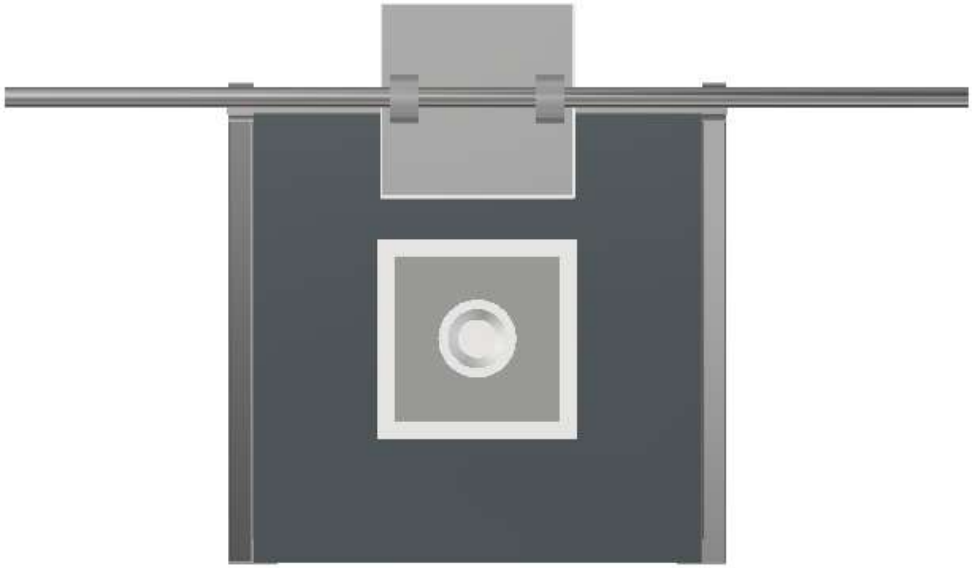


Figura 50. Horno abierto vista superior

CAPITULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparación de parámetros técnicos y costos

Para la comparación de parámetros técnicos se seleccionó el horno del benchmarking que se acerca de mejor manera a las aplicaciones que dispone el horno diseñado como uso de crisol de 2 litros y posibilidad de tratamientos térmicos ya que poseen una cámara interna con espacio libre a diferencia de otras opciones de crisol fijo. Dicho horno que cumple con esos requerimientos, especificaciones y que además se encuentra en un rango de precio competitivo respecto al diseñado es el “Kintek Muffle furnace KT-M14-12L”.

Tabla 27. Comparación Diseño V/S Producto externo

Parámetro	Diseño propio	Muffle furnace KT-M14-12L
Tamaño de cámara interna	342,9 x 342,9 x 304,9 [mm] (36 [L])	200 x 200 x 300 [mm] (12 [L])
Temperatura máxima de operación [°C]	1300	1300
Termocupla	Tipo S	Tipo S

Precisión de control de temperatura [°C]	± 0,6	± 1,0
Potencia de calentamiento[kW] (Monofásico 50 [Hz])	4,84	4,50
Velocidad máxima de calentamiento [°C/min]	0 – 23	0 – 15
Elemento calefactor	Resistencia Kanthal A-1 alambre	Varas de carburo de silicio
Peso [kg]	238,6 (horno) 80,7 (Armazón y barra)	60 (horno)
CAPEX [CLP]	2.995.138	3.955.226
Disponibilidad de componentes para mantenimiento	Adquiribles en mercado local	Importados de mercado internacional

De la Tabla 27 se observa que el horno diseñado es superior en las siguientes categorías:

Tamaño de cámara interna, precisión de control de temperatura, velocidad máxima de calentamiento, CAPEX, disponibilidad, costo y lead time de repuestos.

CAPITULO 7. CONCLUSIONES

La propuesta de diseño teóricamente cumple de manera satisfactoria los objetivos, funciones y restricciones planteadas, adaptándose de manera personalizada a las necesidades del cliente como el tipo de energía, tamaño de cámara interna, capacidad de carga, peso, seguridad, control de temperaturas, temperatura máxima y otras mencionadas en la etapa de diseño conceptual, tomando de referencia las funciones definidas en la caja transparente, a los competidores evaluados en el benchmarking, matriz QFD y búsquedas externas. Herramientas con las cuales mediante una lluvia de ideas y carta morfológica se generaron conceptos propuestos los cuales al ser evaluados se determina el que se adapta de mejor manera a la lista de atributos deseados y al complementar dicho concepto con un análisis y diseño modular se logró definir la estructura y componentes definitivos que satisfacen dichos atributos.

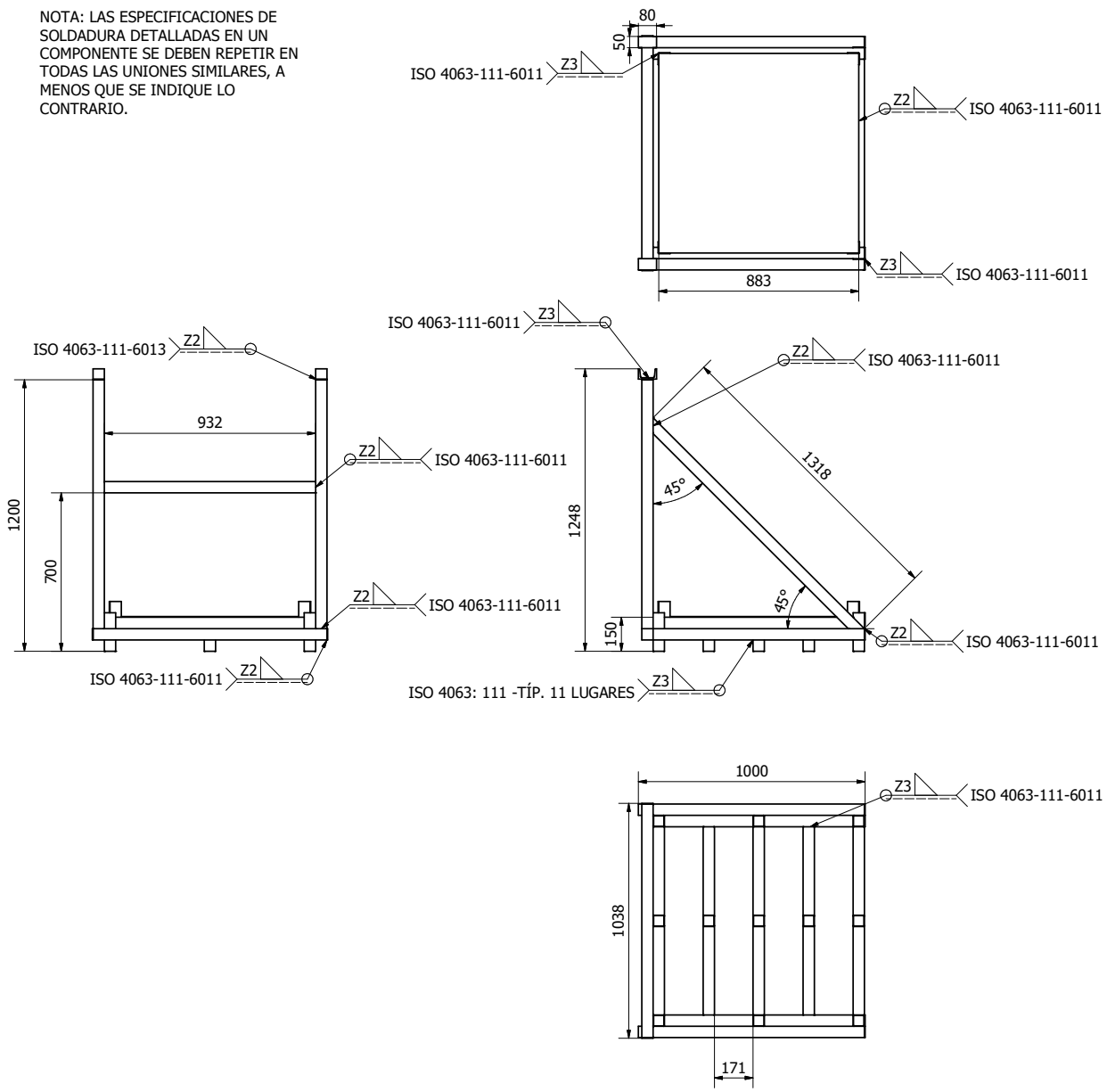
El diseño final corresponde a un horno de dimensiones externas de 930 x 930 x 906 mm (excluido el armazón de soporte), con un peso de 319,3 kg, con una cámara interna de base cuadrada de 342,9 x 342,9 x 304,8 mm de espacio útil capaz de alcanzar temperaturas de 1300°C de manera controlada y programable, permitiendo al cliente realizar tratamientos térmicos en elementos y fundir material mediante el uso de un crisol, ya sea el crisol de 2 litros mencionado previamente o uno de mayor capacidad mientras sus dimensiones no sobrepasen las limitaciones geométricas de la cámara interna. Como elemento calefactor utiliza una resistencia de alambre Kanthal A-1 la cual opera a 220 V y 22 A proporcionando una potencia de 5280 W. Dichas especificaciones ofrecen una versatilidad que no se encuentra en el mercado nacional ni internacional por el precio de 2.995.138 CLP convirtiendo a este diseño en la opción predilecta en contraste con la competencia.

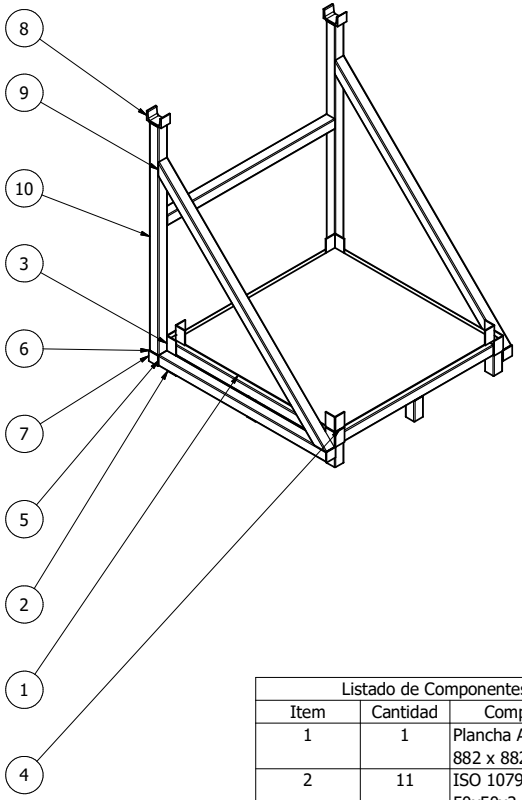
ANEXOS

Tabla 28. Variables de cálculo térmico [14] [26] [27] [28] [29] [30]

Variables	Valor
ε_{gap}	0.15 [-]
ε_{ext}	0.85 [-]
T_{amb}	298,15 [K]
$T_{interna}$	1573,15 [K]
V_{in}	220 [V]
I_{in}	24 [A]
W_{Horno}	5280 [W]
$K_{ladrillo\ (1273\ K)}$	0.38 [W/m*K]
$K_{manta\ 128\ (1273\ K)}$	0.16[W/m*K]
$K_{manta\ 96\ (1273\ k)}$	0.19 [W/m*K]
$K_{placa\ (1273\ K)}$	0.14 [W/m*K]
σ	5.67 $x10^{-8}$ [W/m^2*K^4]

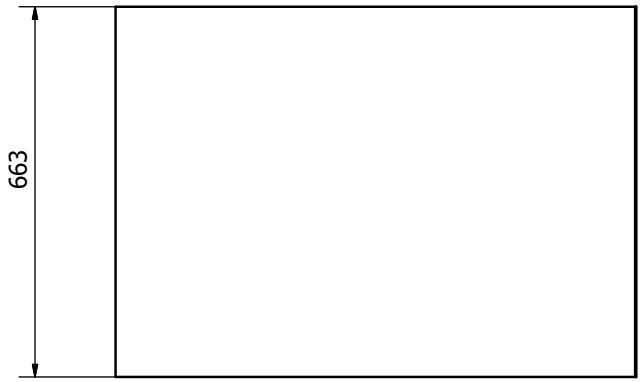
NOTA: LAS ESPECIFICACIONES DE SOLDADURA DETALLADAS EN UN COMPONENTE SE DEBEN REPETIR EN TODAS LAS UNIONES SIMILARES, A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO.

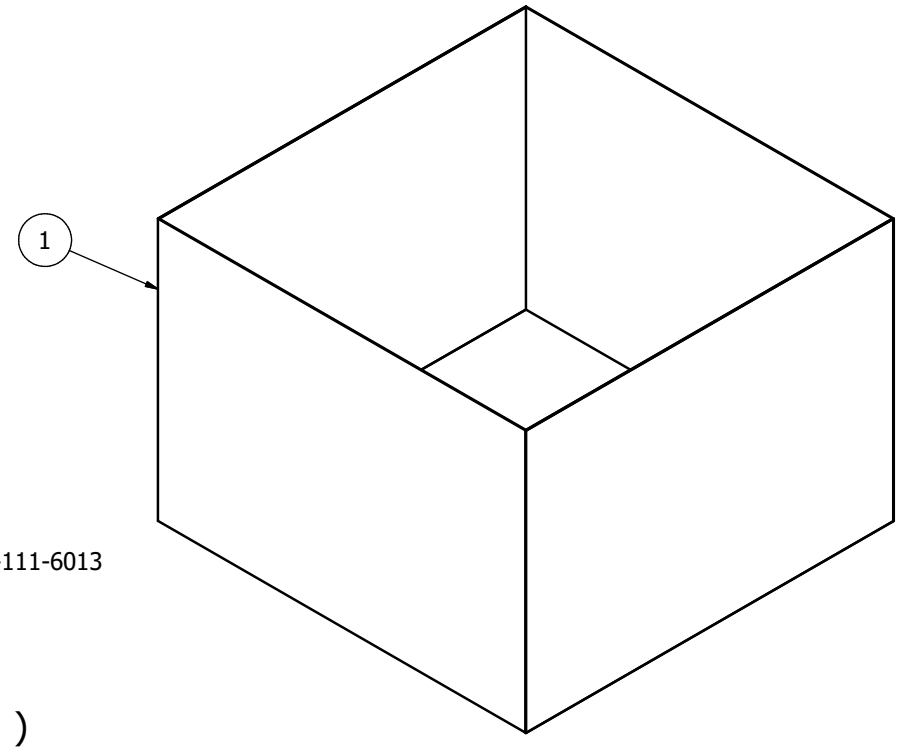


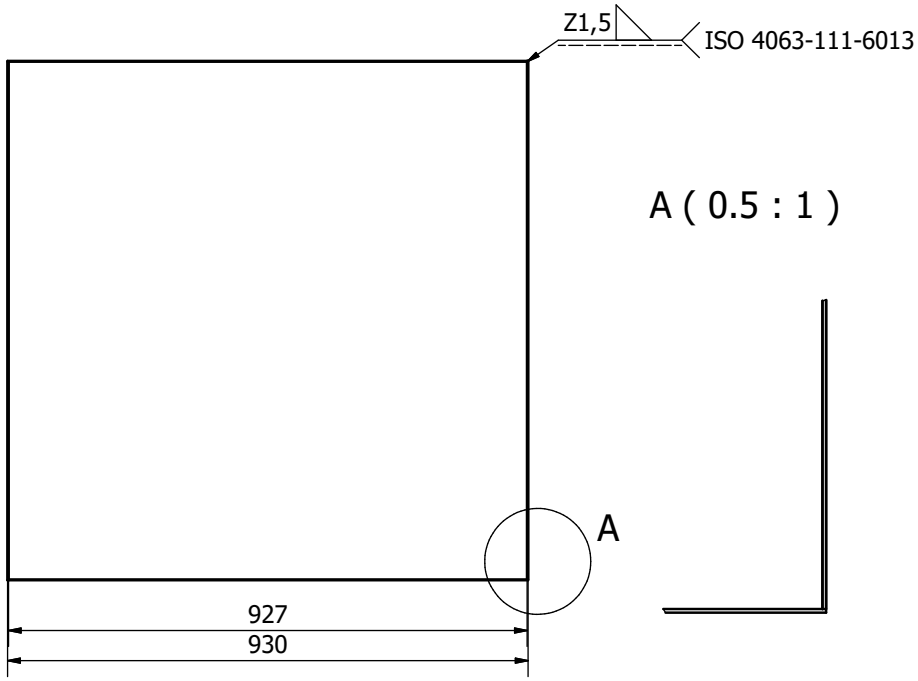


Listado de Componentes		
Item	Cantidad	Componente
1	1	Plancha Acrero 3 x 882 x 882 mm
2	11	ISO 10799-2 - 50x50x2 - 100
3	16	Platina (mm) 50 x 70 x 3
4	5	ISO 10799-2 - 50x50x2 - 832
5	5	ISO 10799-2 - 50x50x2 - 932
6	1	ISO 10799-2 - 50x50x2 - 1032
7	6	Platina (mm) 50 x 50 x 3
8	2	ISO 657/11 - CH 80 x 8 - 50
9	2	ISO 10799-2 - 50x50x2 - 1318
10	2	ISO 10799-2 - 50x50x2 - 1100

Diseñado por: Tomás Santa María	Revisado por: Ricardo Chavez	Revisado por: Ricardo Chavez	Fecha: 06/07/26	Escala: 1 : 14		
Departamento Ing. Mecánica		Armazón horno				
Toleranias: ISO 2768-m	Peso del conjunto: 74,9 kg	AHUTFSM01	Unidades: mm	Edición: 1	Hoja: 1/1	





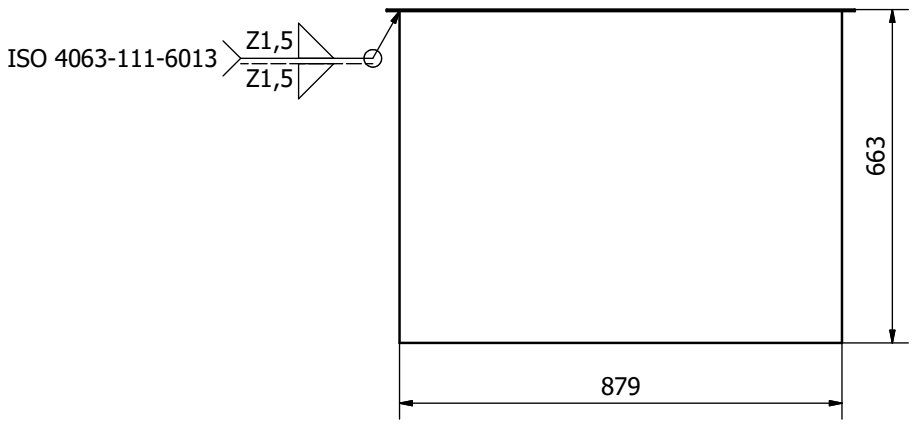


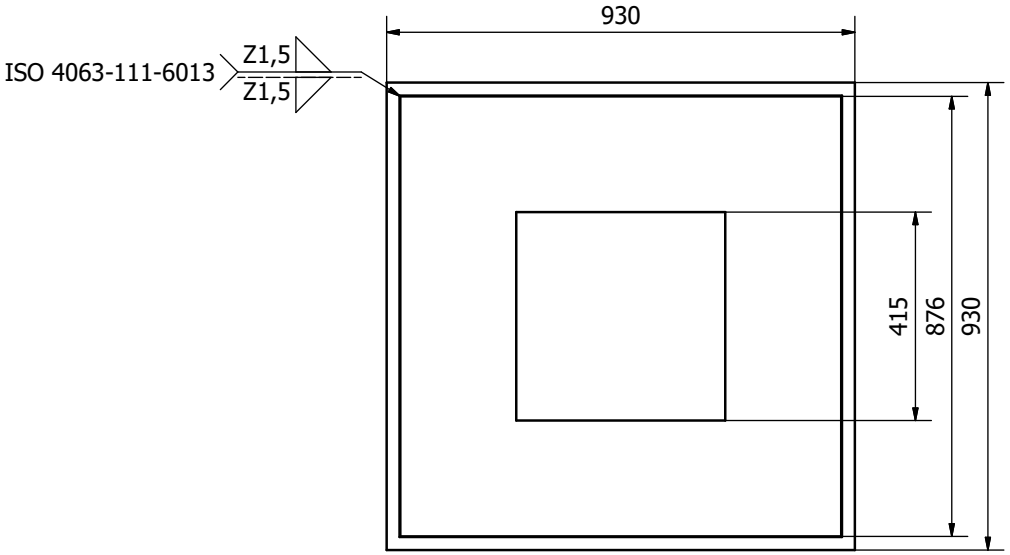
A (0.5 : 1)

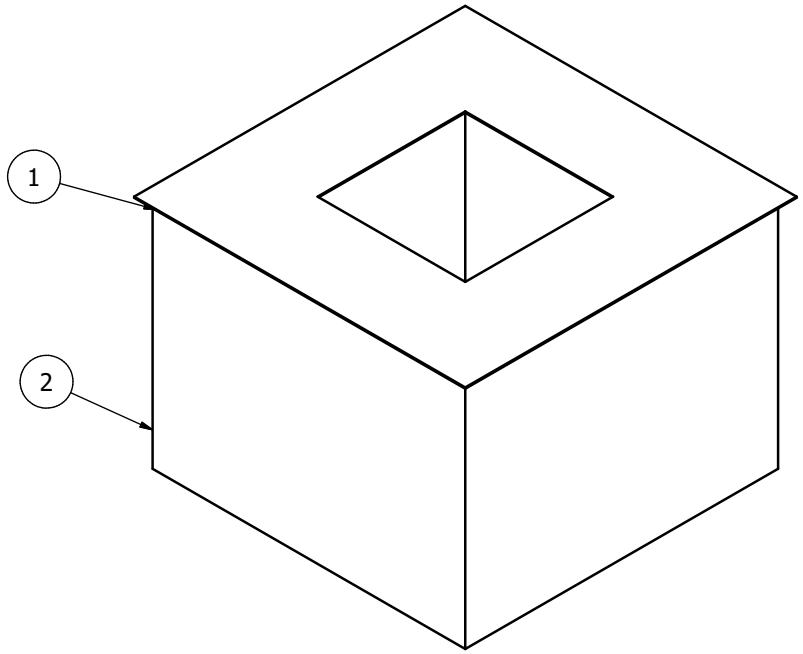
NOTA: LAS ESPECIFICACIONES DE SOLDADURA DETALLADAS EN UN COMPONENTE SE DEBEN REPETIR EN TODAS LAS UNIONES SIMILARES, A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO.

Lista de Componentes		
Item	Cantidad	Componente
1	4	Plancha Acero 1.5 x 928.5 x 744 mm

Diseñado por: Tomás Santa María	Revisado por: Ricardo Chavez	Revisado por: Ricardo Chavez	Fecha: 29/07/26	Escala: 1 : 9	
	Departamento Ing. Mecánica	Planchas Laterales Externas			
	Toleranias: ISO 2768-m	Peso del conjunto: 43,5 kg	PLEHUTFSM01	Unidades: mm	Edición: 2	Hoja: 1/1





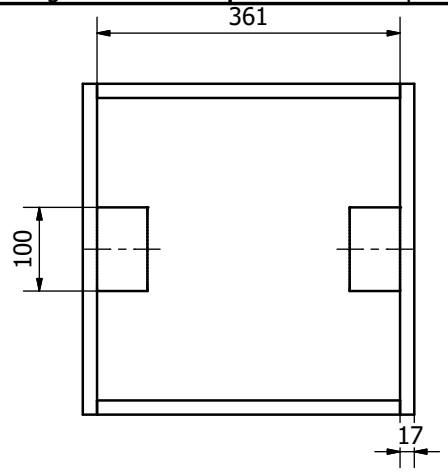


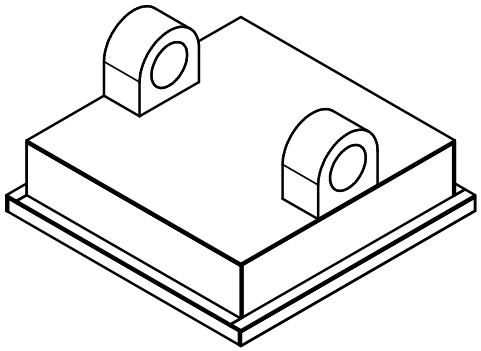
NOTA: LAS ESPECIFICACIONES DE SOLDADURA DETALLADAS EN UN COMPONENTE SE DEBEN REPETIR EN TODAS LAS UNIONES SIMILARES, A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO.

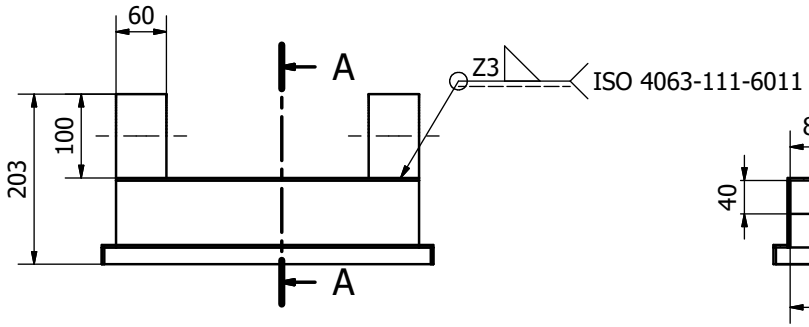
Lista de Componentes

Item	Cantidad	Componente
1	1	Plancha Acero 3 x 930 x 930 mm
2	4	Plancha Acero 1.5 x 870 x 744 mm

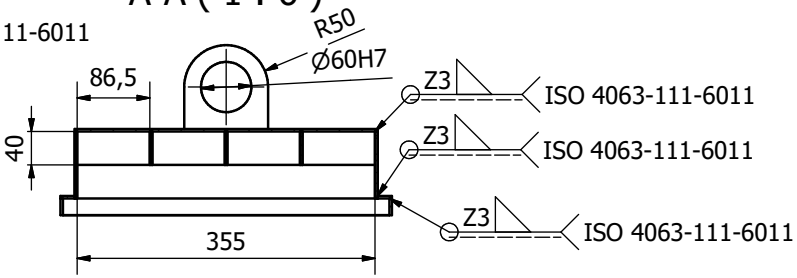
Diseñado por: Tomás Santa María	Revisado por: Ricardo Chavez	Revisado por: Ricardo Chavez	Fecha: 06/07/26	Escala: 1:10	
Departamento Ing. Mecánica		Carcaza Interna			
Toleranias: ISO 2768-m	Peso del conjunto: 43,6 kg	CIHUTFSM01	Unidades: mm	Edición: 1	Hoja: 1/1

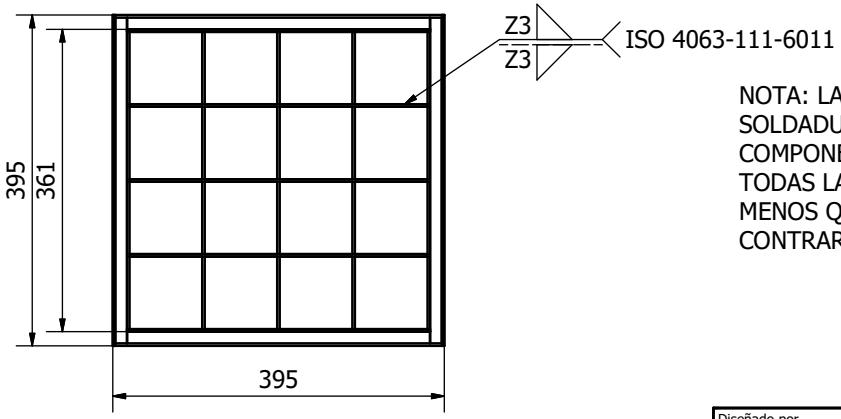






A-A (1 : 6)

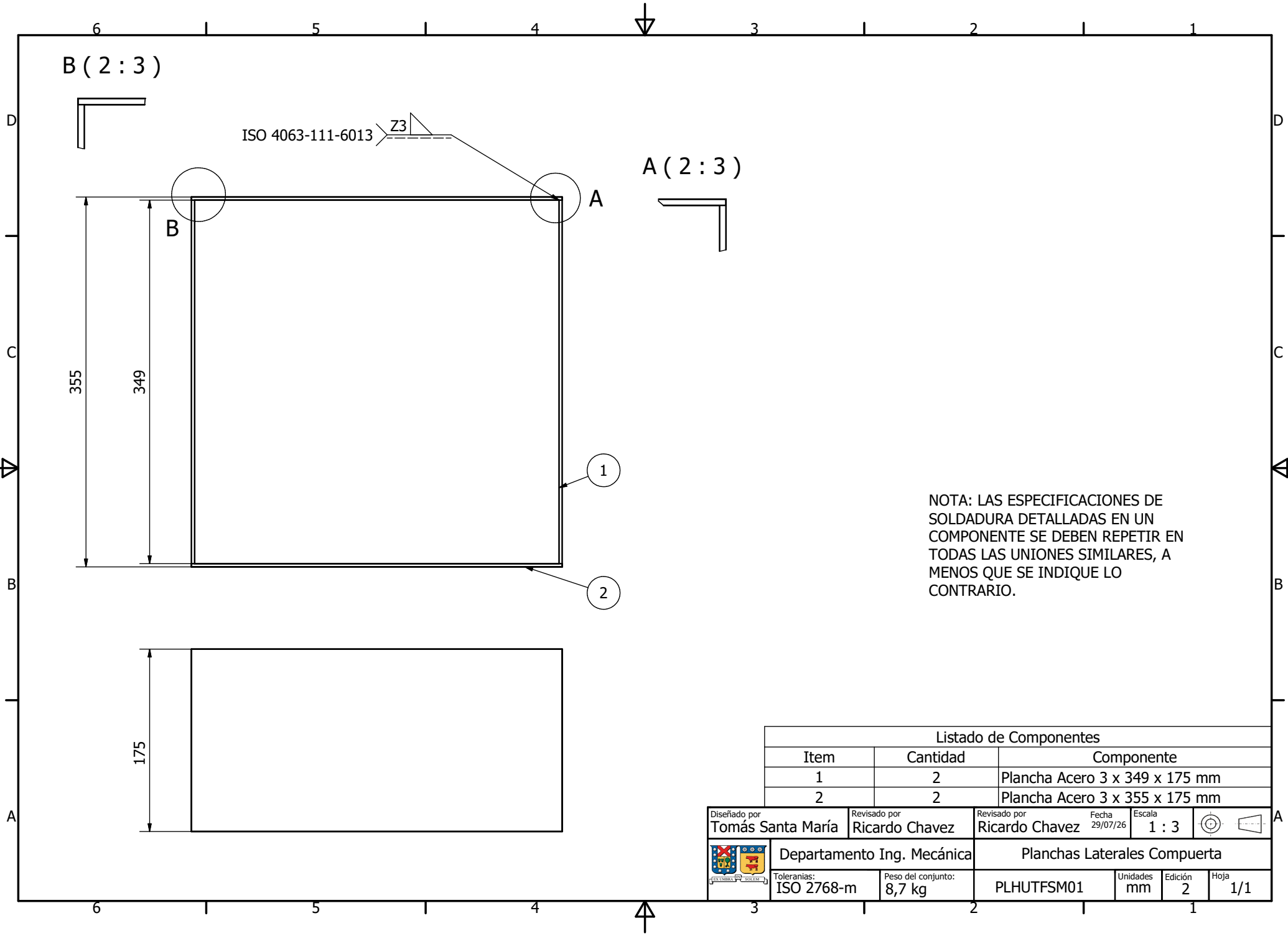




NOTA: LAS ESPECIFICACIONES DE SOLDADURA DETALLADAS EN UN COMPONENTE SE DEBEN REPETIR EN TODAS LAS UNIONES SIMILARES, A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO.

Listado de componentes	
Cantidad	Componente
2	Pletina 389 x 20 x 3 mm
2	Pletina 395 x 20 x 3 mm
2	Pletina 395 x 17 x 3 mm
4	Pletina 361 x 80 x 3 mm
1	Plancha Acero 361 x 361 x 3 mm
3	Pletina 355 x 40 x 3 mm
12	Pletina 86,5 x 40 x 3 mm

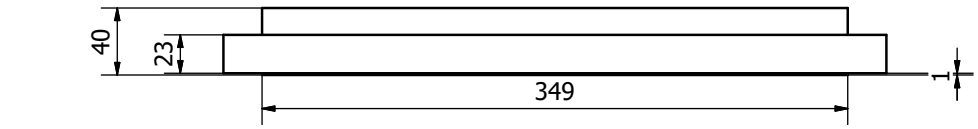
Diseñado por: Tomás Santa María	Revisado por: Ricardo Chavez	Revisado por: Ricardo Chavez	Fecha: 06/07/26	Escala: 1 : 6	
Departamento Ing. Mecánica		Plancha Superior Compuerta			
Toleranias: ISO 2768-m	Peso del conjunto: 17,6 kg	PSCHUTFSM01	Unidades: mm	Edición: 1	Hoja: 1/1

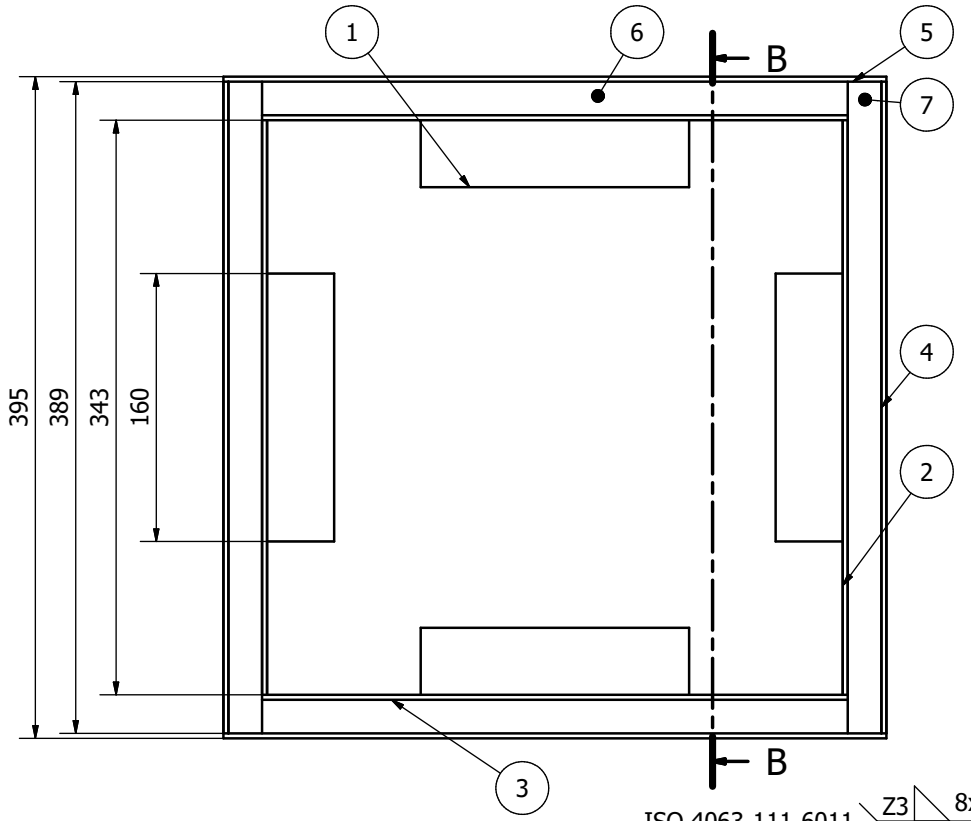


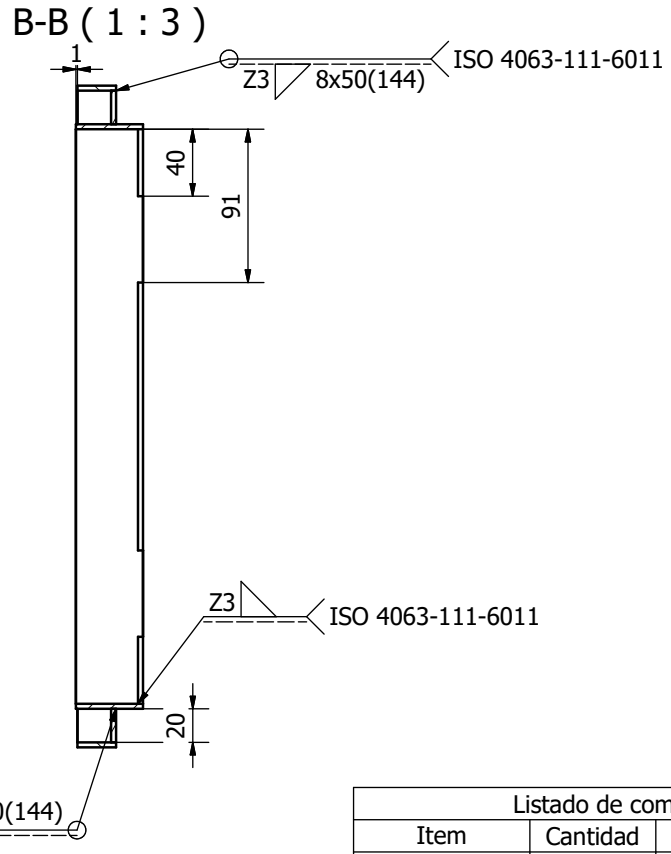
NOTA: LAS ESPECIFICACIONES DE SOLDADURA DETALLADAS EN UN COMPONENTE SE DEBEN REPETIR EN TODAS LAS UNIONES SIMILARES, A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO.

Listado de Componentes		
Item	Cantidad	Componente
1	2	Plancha Acero 3 x 349 x 175 mm
2	2	Plancha Acero 3 x 355 x 175 mm

Diseñado por: Tomás Santa María	Revisado por: Ricardo Chavez	Revisado por: Ricardo Chavez	Fecha: 29/07/26	Escala: 1 : 3	
Departamento Ing. Mecánica		Planchas Laterales Compuerta			
Toleranias: ISO 2768-m	Peso del conjunto: 8,7 kg	PLHUTFSM01	Unidades: mm	Edición: 2	Hoja: 1/1





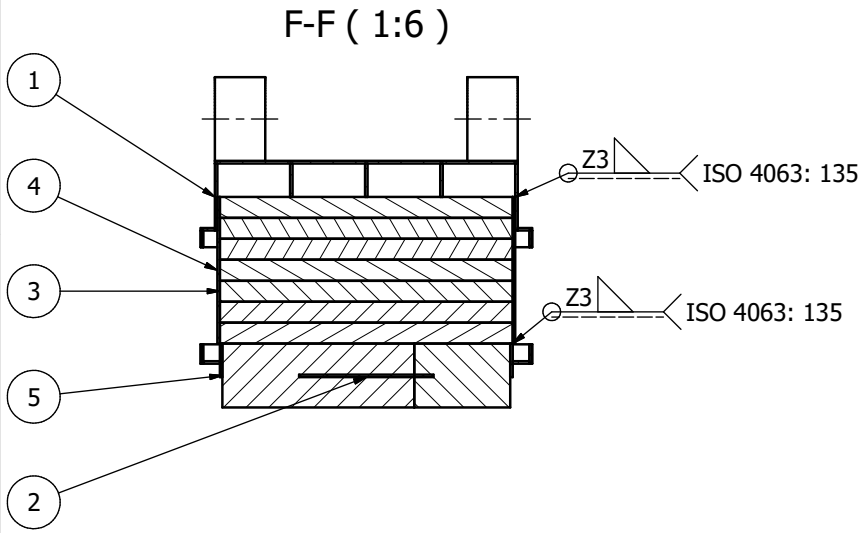


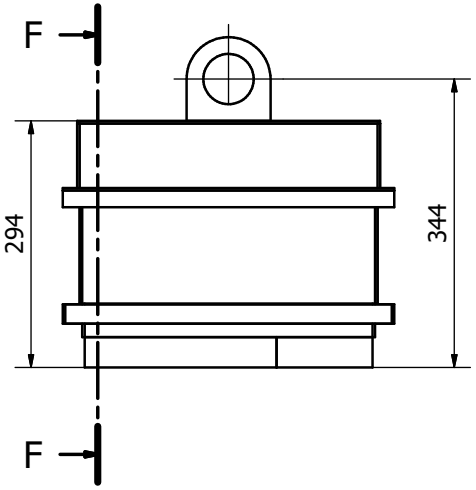
NOTA: LAS ESPECIFICACIONES DE SOLDADURA DETALLADAS EN UN COMPONENTE SE DEBEN REPETIR EN TODAS LAS UNIONES SIMILARES, A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO.

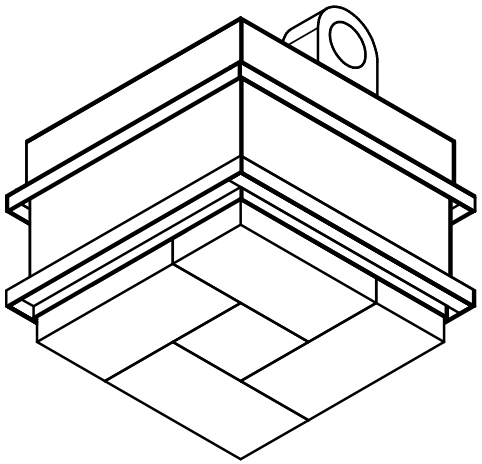
Listado de componentes

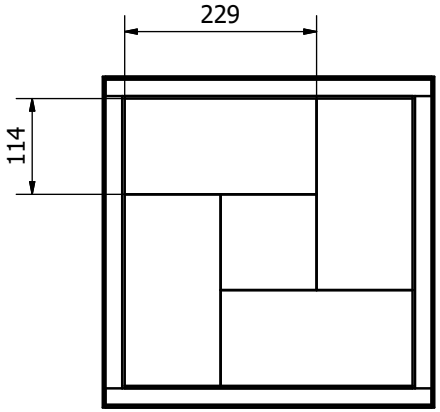
Item	Cantidad	Componente
1	4	Pletina 160 x 40 x 3 mm
2	2	Pletina 343 x 40 x 3 mm
3	2	Pletina 349 x 40 x 3 mm
4	2	Pletina 389 x 40 x 3 mm
5	2	Pletina 395 x 40 x 3 mm
6	2	Pletina 349 x 20 x 3 mm
7	2	Pletina 389 x 20 x 3 mm

Diseñado por: Tomás Santa María	Revisado por: Ricardo Chavez	Revisado por: Ricardo Chavez	Fecha: 29/07/26	Escala: 1 : 3	
Departamento Ing. Mecánica		Marco Soporte Ladrillos			
Toleranias: ISO 2768-m	Peso del conjunto: 4,1 kg	MSLHUTFSM01	Unidades: mm	Edición: 2	Hoja: 1/1



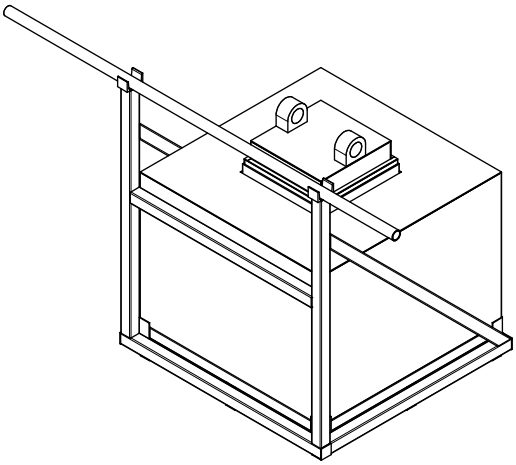


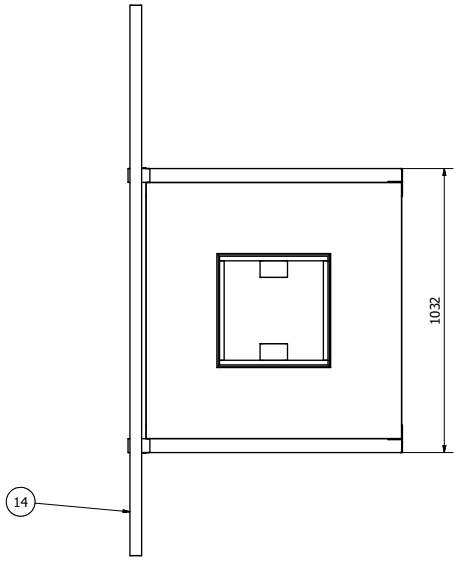




Listado de componentes		
Item	Cantidad	Componente
1	1	Pancha Compuerta Superior
2	1	Marco Soporte Ladrillos
3	7	Placas Fibra Silicato 25 x 348,9 x 348,9 mm
4	1	Planchas Laterales Compuerta
5	4 1/2	Ladrillos K-26

Diseñado por Tomás Santa María	Revisado por Ricardo Chavez	Revisado por Ricardo Chavez	Fecha 29/07/26	Escala 1:6		
Departamento Ing. Mecánica		Compuerta Horno				
Toleranias: ISO 2768-m	Peso del conjunto: 42,3 kg	CHUTFSM01	Unidades mm	Edición 2	Hoja 1/1	

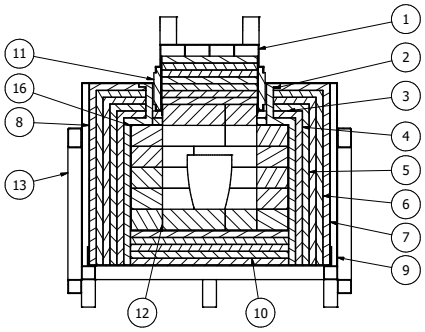


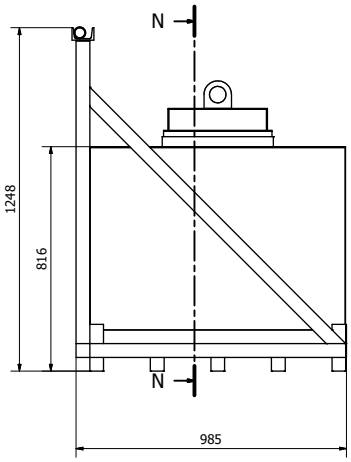


NOTA: LAS ESPECIFICACIONES DE SOLDADURA DETALLADAS EN UN COMPONENTE SE DEBEN REPETIR EN TODAS LAS UNIONES SIMILARES, A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO.

LA UBICACIÓN DE ELEMENTOS COMO SENSORES Y RESISTENCIA QUEDAN A CRITERIO DEL FABRICANTE

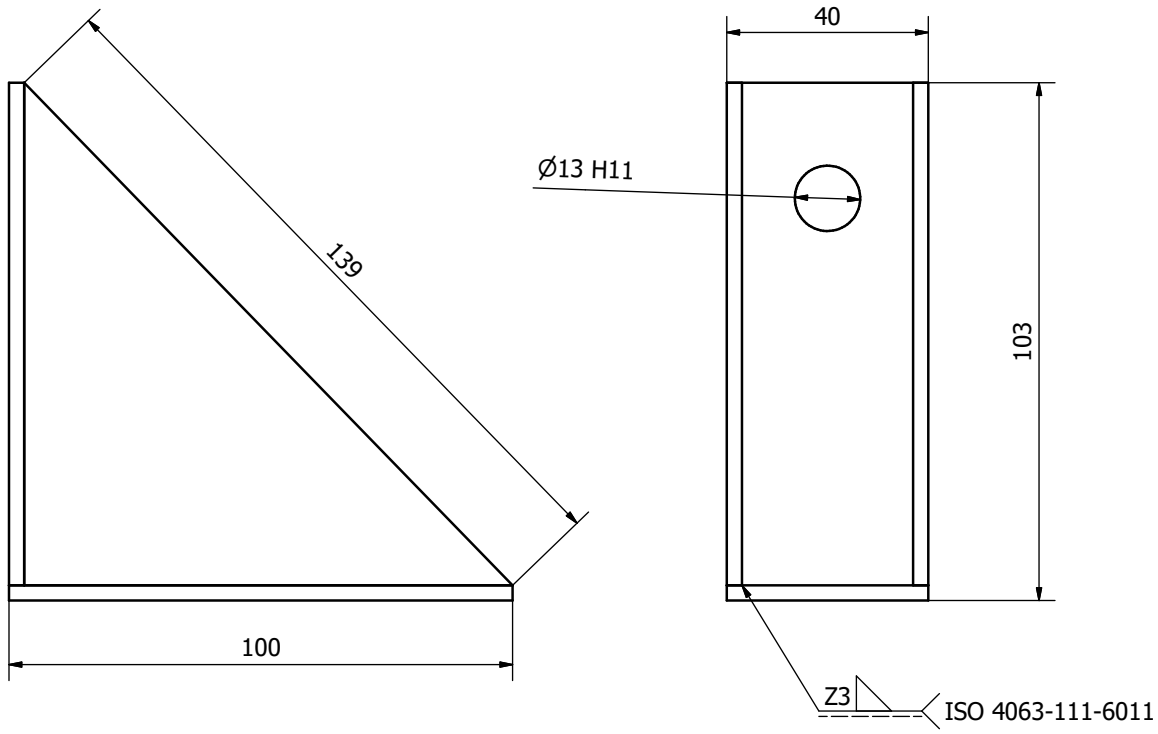
N-N (1 : 10)





Listado de componentes			
Item	Cantidad	Componente	Descripción
1	1	Compuerta Superior	
2	4	Manta de Fibra de Silicato	128 kg/m3, Zirc, 753 x 610 x 25 mm
3	5	Manta de Fibra de Silicato	128 kg/m3, 666 x 520 x 25mm
4	5	Manta de Fibra de Silicato	96 kg/m3, 715 x 560 x 25 mm
5	5	Manta de Fibra de Silicato	96 kg/m3, 740 x 600 x 25 mm
6	6	Manta de Fibra de Silicato	96 kg/m3, 765 x 550 x 25 mm
7	6	Manta de Fibra de Silicato	96 kg/m3, 790 x 600 x 25mm
8	1	Planchas Laterales Internas	
9	1	Planchas Laterales Externas	
10	5	Placas Fibra Silicato 25 x 575,5 x 575,5 mm	320 kg/m3, 25 x 575,5 x 575,5 mm
11	1	Manta de Fibra de Silicato	128 kg/m3, Zirc, 1440 x 156 x 25 mm
12	43 1/2	Ladrillos K-26	3" x 9" x 4 1/2"
13	1	Armazón	
14	1	ISO 10799-2	42,4 x 3,0 x 2.000mm
15	2	Placa de fibra de Silicato	320 kg/m3, 415 x 415 x 25, corte centrado de 343 x 343
16	1	Mortero Refractario	Capa externa de 2 mm en cámara interna y union de ladrillos

Diseñado por: Tomás Santa María	Revisado por: Ricardo Chavez	Revisado por: Ricardo Chavez	Fecha: 29/07/26	Escala: 1 : 10	
Departamento Ing. Mecánica		Horno de Fundición y Tratamientos Térmicos UTFSM			
Tolerancias: ISO 2768-m	Peso del conjunto: 319,3 kg	HFTTCUTFSM01	Unidades: mm	Edición: 2	Hoja: 1/1



NOTA: LAS ESPECIFICACIONES DE SOLDADURA DETALLADAS EN UN COMPONENTE SE DEBEN REPETIR EN TODAS LAS UNIONES SIMILARES, A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO.

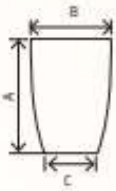
PARTS LIST	
Cantidad	Componente
2	Plancha Acero 3 x 100 x 40 mm
1	Plancha Acero 3 x 97 x 97

Diseñado por: Tomás Santa María	Revisado por: Ricardo Chavez	Revisado por: Ricardo Chavez	Fecha: 06/07/26	Escala: 1 : 1	
Departamento Ing. Mecánica		Soporte Sensor Inducción			
Toleranias: ISO 2768-m	Peso del conjunto: 0,4 kg	SSIHUTFSM01	Unidades: mm	Edición: 1	Hoja: 1/1

Linha Carbeto de Silício

Silicon Carbide Line

Tipo *type* A



	A (mm)	ØD (mm)	ØC (mm)	ALUMÍNIO ALUMINUM (KG)	COBRE COPPER	LITROS LITERS
A 1	95	75	52	0.4	1.4	0.18
A 2	112	98	71	0.9	2.9	0.37
A 3	132	100	71	1.1	3.7	0.47
A 4	140	116	80	1.6	5.2	0.66
A 5	150	118	80	1.7	5.6	0.72
A 6	170	136	95	2.6	8.5	1.08
A 8	186	138	95	3	9.8	1.25
A 10	197	162	110	4.3	14	2
A 13	220	165	110	5	16	2
A 16	230	195	133	7.8	26	3
A 20	250	198	133	9	29	4
A 25	247	221	158	10	33	4
A 30	302	224	158	13	43	6
A 40	318	248	178	17	57	7
A 50	338	252	178	19	62	8
A 60	352	284	200	25	83	11
A 70	392	291	200	29	94	12
A 80	375	323	230	35	114	15
A 100	419	324	230	41	134	17
A 120	424	354	250	47	153	20
A 150	482	357	250	54	177	23
A 200	521	415	285	86	283	36
A 250	580	419	285	97	318	41
A 300	570	449	328	111	366	47
A 400	663	504	305	156	515	66
A 500	671	533	338	174	574	73
A 600	730	540	338	194	641	82

Figura 51. Ficha técnica crisol [22]

KANTHAL®

KANTHAL® A-1
ALAMBRE DE CALENTAMIENTO POR RESISTENCIA Y ALAMBRE DE RESISTENCIA

Alambre Kanthal® A-1 es una aleación ferrítica de hierro-cromo-aluminio (aleación de FeCrAl) que se puede usar a temperaturas de hasta 1400 °C (2550 °F). Esta aleación se caracteriza por su alta resistividad y una muy buena resistencia a la oxidación.

Alambre Kanthal® A-1 se utiliza generalmente en elementos de calentamiento eléctricos de hornos de alta temperatura en las industrias de tratamiento térmico, cerámica, vidrio, acero y electrónica.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

	C %	Si %	Mn %	Cr %	Al %	Fe %
†Composición nominal					5,8	Bal.
Mín.	-	-	-	20,5	-	
Máx.	0,08	0,7	0,4	23,5	-	

†Nota: La composición indicada es nominal. La composición real puede variar para cumplir con la resistencia eléctrica estándar y las tolerancias dimensionales.

PROPIEDADES FÍSICAS

Densidad g/cm^3 (lb/in^3)	7,10 (0,257)
Resistividad eléctrica a 20 °C Ω mm^2/m (Ω mil circ./ft)	1,45 (872)
Coeficiente de Poisson	0,30

MÓDULO DE YOUNG

Temperatura °C	20	100	200	400	600	800	1000
Temperatura °F	68	212	392	752	1112	1472	1832
GPa	220	210	205	190	170	150	130
Msi	32	30	30	28	25	22	19

Hoja de datos actualizada 2024-09-06 07:26 (sustituye todas las ediciones anteriores)

Figura 52. Propiedades Resistencias Kanthal A-1 I [31]

COEFICIENTE DE RESISTIVIDAD A LA TEMPERATURA

Temp. °C	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Temp. °F	212	392	572	752	932	1112	1292	1472	1652	1832	2012	2192	2372	2552
Ct	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

COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA

Temperatura °C (°F)	Dilatación térmica x 10^{-6}/K (10^{-6}/°F)
20-250 (68-482)	11 (6,1)
20-500 (68-932)	12 (6,7)
20-750 (68-1382)	14 (7,8)
20-1000 (68-1832)	15 (8,3)

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Temperatura °C	50	600	800	1000	1200	1400
Temperatura °F	122	1112	1472	1832	2192	2552
$W\,m^{-1}\,K^{-1}$	11	20	22	26	27	35
$Btu\,h^{-1}ft^{-1}°F^{-1}$	6,4	11,6	12,7	15,0	15,6	20,2

CAPACIDAD CALORÍFICA ESPECÍFICA

Temperatura °C	20	200	400	600	800	1000	1200	1400
Temperatura °F	68	392	752	1112	1472	1832	2192	2552
$kJ\,kg^{-1}\,K^{-1}$	0,46	0,56	0,63	0,75	0,71	0,72	0,74	0,80
$Btu\,lb^{-1}\,°F^{-1}$	0,11	0,13	0,15	0,18	0,17	0,17	0,18	0,19

Punto de fusión °C (°F)	1500 (2732)
Temperatura máxima de funcionamiento continuo en aire °C (°F)	1400 (2552)
Propiedades magnéticas	El material es magnético hasta aproximadamente los 600 °C (1112 °F) (punto de Curie).
Emisividad: material completamente oxidado	0,70

PROPIEDADES MECÁNICAS

Diámetro del alambre	Límite elástico	Resistencia a la tracción	Alargamiento	Dureza
Ø	$R_{p0,2}$	R_m	A	

Hoja de datos actualizada 2024-09-06 07:26 Sustituye todas las ediciones anteriores

2 KANTHAL® A-1

Figura 53. Propiedades resistencias Kanthal A-1 II [31]

mm (in)	MPa (ksi)	MPa (ksi)	%	Hv
1,0 (0,04)	545 (79)	760 (110)	20	240
4,0 (0,16)	475 (69)	680 (99)	18	230

PROPIEDADES MECÁNICAS A TEMPERATURAS ELEVADAS

Temperatura °C	900	1000	1100	1200	1300
Temperatura °F	1652	1832	2012	2192	2372
MPa	34	18	10	6	4
ksi	4,9	2,6	1,5	0,9	0,6

Resistencia a la rotura por tracción: tasa de deformación 6,2 x 10^{-2}/min

RESISTENCIA A LA FLUENCIA: ALARGAMIENTO DEL 1 % EN 1000 H

Temperatura °C	800	1000
Temperatura °F	1472	1832
MPa	1,2	0,5
psi	170	73

Descargo de responsabilidad: Las recomendaciones son solo orientativas, y la idoneidad de un material para una aplicación específica se puede confirmar solo cuando conocemos las condiciones reales de utilización. Debido al desarrollo continuo de los materiales, es posible que sea necesario realizar cambios en los datos técnicos sin previo aviso. Esta ficha técnica solo es válida para materiales que lleven la marca comercial Kanthal®.

Hoja de datos actualizada 2024-09-06 07:26 (sustituye todas las ediciones anteriores)

KANTHAL.COM

KANTHAL®

Figura 54. Propiedades resistencias Kanthal A-1 III [31]

KANTHAL® APM
ALAMBRE DE CALENTAMIENTO POR RESISTENCIA Y ALAMBRE DE RESISTENCIA

Alambre Kanthal® APM es una aleación ferrítica de hierro-cromo-aluminio (aleación de FeCrAl) pulvimetalúrgica avanzada, reforzada por dispersión, que se puede usar a temperaturas de hasta 1425 °C (2600 °F). Esta aleación se caracteriza por su extraordinaria estabilidad dimensional y resistencia a la oxidación.

Alambre Kanthal® APM tiene una tendencia al envejecimiento y una variación de resistencia bajas. Tiene excelentes propiedades de oxidación superficial, lo que brinda una buena protección en atmósferas corrosivas, así como en atmósferas con alto potencial de carbono y sin incrustaciones.

La combinación única de sus excelentes propiedades de oxidación y estabilidad dimensional contribuye a prolongar la vida útil de los elementos. La estabilidad dimensional superior de la aleación reduce la cantidad necesaria de soporte de elementos.

Kanthal® APM se utiliza habitualmente en hornos de alta temperatura para la cocción de cerámica, en tratamientos térmicos, y en hornos de laboratorio, de difusión y para la industria electrónica.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

	C %	Si %	Mn %	Cr %	Al %	Fe %
†Composición nominal					5,8	Bal.
Mín.	-	-	-	20,5	-	
Máx.	0,08	0,7	0,4	23,5	-	

† Nota: La composición indicada es nominal. La composición real puede variar para cumplir con la resistencia eléctrica estándar y las tolerancias dimensionales.

PROPIEDADES FÍSICAS

Densidad g/cm^3	7,10
Resistividad eléctrica a 20 °C Ω mm^2/m	1,45
Coeficiente de Poisson	0,30

Hoja de datos actualizada 2024-09-06 07:27 (sustituye todas las ediciones anteriores)

1 KANTHAL® APM

Figura 55. Propiedades resistencias Kanthal APM I [32]

MÓDULO DE YOUNG

Temperatura °C	20	100	200	400	600	800	1000
GPa	220	210	205	190	170	150	130

COEFICIENTE DE RESISTIVIDAD A LA TEMPERATURA

Temp. °C	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Ct	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

COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA

Temperatura °C	Dilatación térmica x 10^{-6}/K
20-250	11
20-500	12
20-750	14
20-1000	15
20-1200	16
20-1400	16

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Temperatura °C	50	600	800	1000	1200	1400
W m^{-1} K^{-1}	11	20	22	26	27	35

CAPACIDAD CALORÍFICA ESPECÍFICA

Temperatura °C	20	200	400	600	800	1000	1200	1400
kJ kg^{-1} K^{-1}	0,46	0,56	0,63	0,75	0,71	0,72	0,74	0,80

Punto de fusión °C	1500
Temperatura máxima de funcionamiento continuo en aire °C	1425
Propiedades magnéticas	El material es magnético hasta aproximadamente los 600 °C (punto de Curie).
Emisividad: material completamente oxidado	0,70

PROPIEDADES MECÁNICAS

Diámetro del alambre	Límite elástico	Resistencia a la tracción	Alargamiento	Dureza

Hoja de datos actualizada 2024-09-06 07:27 (sustituye todas las ediciones anteriores)

2 KANTHAL® APM

Figura 56. Propiedades resistencias Kanthal APM II [32]

Ø	$R_{p0,2}$	R_m	A	
mm	MPa	MPa	%	Hv
4,0	470	680	20	230

PROPIEDADES MECÁNICAS A TEMPERATURAS ELEVADAS

Temperatura °C	900	1000	1100	1200	1300
MPa	40	23	16	12	9

Resistencia a la rotura por tracción: tasa de deformación 6,2 x 10^{-2}/min

RESISTENCIA A LA FLUENCIA: ALARGAMIENTO DEL 1 % EN 1000 H

Temperatura °C	800	900
MPa	8,2	3,5

RESISTENCIA A LA FLUENCIA: ALARGAMIENTO DEL 0,1 % EN 1000 H

Temperatura °C	1100	1200	1300	1400
MPa	2,3	1,2	0,7	0,4

RESISTENCIA A LA ROTURA POR FLUENCIA

Tiempo	800 °C	1472 °F	1000 °C	1832 °F	1200 °C	2192 °F	1400 °C	2552 °F
h	MPa	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	psi
100	15,0	2176	5,6	812	3,3	478	1,3	189
1000	11,3	1640	3,4	478	1,6	232	0,5	72
10 000	8,2	1190	2,2	320	0,7	100	0,2	30

Los datos de las tablas se aplican a materiales con estructura de grano fino en el rango de temperaturas de 800 °C a 900 °C
y a materiales con estructura de grano grueso en el rango de temperaturas de 1100 °C a 1400 °C.
KANTHAL APM siempre se entrega en un estado de estructura de grano fino. Después de su uso durante un cierto período de tiempo, el grano se vuelve grueso.

Descargo de responsabilidad: Las recomendaciones son solo orientativas, y la idoneidad de un material para una aplicación específica se puede confirmar solo cuando conocemos las condiciones reales de utilización. Debido al desarrollo continuo de los materiales, es posible que sea necesario realizar cambios en los datos técnicos sin previo aviso. Esta ficha técnica solo es válida para materiales que lleven la marca comercial Kanthal®.

Hoja de datos actualizada 2024-09-06 07:27 (sustituye todas las ediciones anteriores)

Figura 57. Propiedades resistencias Kanthal APM III [32]

KANTHAL® A-1 AND KANTHAL® APM

Resistivity 1.45 Ω mm² m⁻¹. Density 7.1 g cm⁻³. To obtain resistivity at working temperature, multiply by factor C_t in following table.

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
C_t	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

WIRE STANDARD STOCK ITEMS (AT 20°C)

DIAMETER MM	RESISTANCE Ω/M	RESISTIVITY CM²/Ω	WEIGHT G/M
10.0	0.0185	17017	558
9.5	0.0205	14590	503
8.25	0.0271	9555	380
8.0	0.0288	8712	357
7.35	0.0340	6790	300
7.0	0.0377	5837	273
6.5	0.0437	4673	236
6.0	0.0513	3676	201
5.5	0.0610	2831	169
5.0	0.0738	2127	139
4.75	0.0818	1824	126
4.5	0.0912	1550	113
4.25	0.102	1306	101
4.0	0.115	1090	89.2
3.75	0.131	897	78.4
3.5	0.151	730	68.3
3.25	0.175	584	58.9
3.0	0.205	460	50.2
2.9	0.220	416	46.9
2.8	0.235	374	43.7
2.6	0.273	299	37.7
2.5	0.295	266	34.9
2.4	0.321	235	32.1
2.3	0.349	207	29.5
2.2	0.381	181	27.0
2.0	0.462	136	22.3
1.8	0.570	99.2	18.1
1.7	0.639	83.6	16.1

STRIP STANDARD SIZES (AT 20°C)

WIDTH MM	THICKNESS MM	RESISTANCE Ω/M	RESISTIVITY CM²/Ω	WEIGHT G/M
50	3.0	0.001	109655	1065
40	3.0	0.012	71172	852
30	3.0	0.016	40966	639
25	3.0	0.019	28966	533
20	3.0	0.024	19035	426
15	3.0	0.032	11172	320
50	2.5	0.012	90517	888
40	2.5	0.015	58621	710
30	2.5	0.019	33621	533
25	2.5	0.023	23707	444
20	2.5	0.029	15517	355
15	2.5	0.039	9052	266
50	2.0*	0.015	71724	710
40	2.0*	0.018	46345	568
30	2.0*	0.024	26483	426
25	2.0*	0.029	18621	355
20	2.0*	0.036	12138	284
15	2.0*	0.048	7035	213
50	1.5*	0.019	53276	533
40	1.5*	0.024	34345	426
30	1.5*	0.032	19552	320
25	1.5*	0.039	13707	266
20	1.5*	0.048	8897	213
15	1.5*	0.064	5121	160
50	1.0*	0.029	35172	355
40	1.0*	0.036	22621	284
30	1.0*	0.048	12828	213
25	1.0*	0.058	8966	178
20	1.0*	0.073	5793	142
15	1.0*	0.097	3310	107

* Thickness < 2.5 mm only Kanthal A-1

For minor dimensions please contact Kanthal. Contact information can be found on www.kanthal.com

Figura 58. Catalogo de resistencias Kanthal A-1 y APM [25]

Laurel Refractory

LAUREL

ICCH
Industrial Comercial Chile

Industrial Comercial Chile

LADRILLO AISLANTE K-23/26/30

Versátil y eficaz que ofrece una excelente combinación de aislamiento térmico, resistencia a la temperatura y peso ligero

MATERIAL DE CALIDAD

material refractario hecho de arcillas refractarias de alta pureza. Se caracteriza por su baja conductividad térmica, que lo hace ideal para aplicaciones donde se requiere aislamiento térmico, como en hornos, chimeneas y calderas.

CARACTERISTICAS

- Alta resistencia térmica
- Baja conductividad térmica
- Peso ligero
- Buen aislamiento acústico

APLICACIONES

- Hornos de fundición
- Hornos de recocido
- Hornos de tratamiento térmico
- Chimeneas
- Calderas

DATOS TECNICOS

DESCRIPCIÓN	PROPIEDAD		
	K 23	K 26	K 30
MATERIA PRIMA	Sílice-Alúmina		
Densidad (kg/m³)	580	800	1030
Porosidad	24	34	40
CCS (MPa)	1,2	2,4	3,0
RUL (a 1000 °C)	1000	1200	1300
Tamaño grano (mm)	0,5-2	0,5-2	0,5-2
Temperatura Aplicación (°C)	1260	1430	1690
COMPOSICIÓN QUIMICA (%)			
SiO_2	50	42	26
Fe_2O_3	0,7	0,6	0,3
Al_2O_3	45	55	72
TiO_2	1,2	1,1	0,5
CaO + MgO	0,5	0,3	0,3
K_2O + Na_2O	1	1,1	0,2

Avenida Cerro Los Cóndores 9901, Quilicura, Santiago. Chile
Tel: +56 (2) 25204900 | E-mail: comchile@comercialchile.cl | Web: www.comercialchile.cl

Figura 59. Ficha técnica ladrillos K- [23]

CONTROLADOR TEMPERATURA

AGOSTO/25
HOJA TÉCNICA 90.659 - 1/1

EN PERFILES TÉRMICOS PROGRAMABLES

Diseñado para aplicaciones en las que el valor de consigna (set point) debe variar automáticamente con el tiempo. Permite programar hasta 6 perfiles, cada uno compuesto por 6 segmentos, donde cada segmento puede configurarse con funciones de rampa y mantenimiento.

Para la medición de la temperatura admite diferentes tipos de sensores, incluyendo termocuplas K, J, S, R, entre otras.

Se utiliza en procesos que requieren aumentar o disminuir la temperatura de forma gradual dentro de un tiempo determinado y mantenerla estable durante un período definido. Es ideal para la automatización de procesos térmicos con precisión y seguridad, como en hornos eléctricos industriales, secadores de aire caliente, cámaras climáticas, laboratorios de pruebas térmicas y equipos de ensayos ambientales, entre otros.

Características

- Hasta 2 alarmas, con múltiples modos
- Relé de control SPST de 3 A / 250 VAC
- Permite guardar hasta 6 perfiles de temperatura
- Función de registro de alarmas y curva en tiempo real
- Restricción de potencia de salida en cada paso de cada patrón
- Pantalla a color vivida, interfaz amigable, muy fácil de programar
- Pantalla TFT táctil de 4.3 pulgadas, HMI + controlador de temperatura 2 en 1

ESPECIFICACIONES

CODIGO	G3401081
Funcion	Controlador de perfil térmico (rampa y mantenimiento) con pantalla táctil
Patrones de perfiles	6 perfiles de 6 segmentos, 6 rampas y 6 mantenimientos
Entradas	Termocuplas tipo K, E, J, N, S, T, R y B
Salida	Relé de control SPST de 3 A / 250 VAC
Alarma	2 relés SPST de 3A / 250 VAC
Montaje	Panel
Alimentación	100 - 240 VAC
Incluye	Manual usuario

veto
PRECISION A SU MEDIDA.

Santa Elena de Huechuraba 1701, módulo BB, Parque Medianas, Huechuraba. +562 2355 4400 ventas@veto.cl veto.cl

Figura 60. Ficha técnica Controlador de Temperatura Veto [21]

Indutécnica®
SOLUCIONES INDUSTRIALES

FICHA TÉCNICA

CABLE COMPENSADO TERMOCUPLA B

Código: 07-CCB-003

TEMPERATURA Y HUMEDAD » CABLES » TERMOCUPLAS » TIPO S/R

Descripción

Cable compensado Tc R/S Fibra/Fibra/Malla Metalica 1x2x0,22mm. Ø 3.6mm Redondo
Cable compensado para termocupla tipo R/S, 2 hilos, aislación de fibra de vidrio, cubierta interior de fibra de vidrio y cubierta exterior de malla de acero galvanizado con franja color naranjo, calibre 2×0.22mm2, diámetro exterior 3.6mm, conductor positivo; naranjo (E-Cu), conductor negativo; blanco (CuNiMn), T° de uso hasta 400°C en el ambiente.

Construcción
Conductor (hilo)

E-Cu (+) CuNiaMn (-)
Según estándar DIN 43722
Aislación

Fibra de vidrio
Identificación: 1 naranjo (+) y 1 blanco (-)
Según estándar DIN 43722 – IEC 584
Cubierta interior

Fibra de vidrio
Cubierta exterior

Malla de acero galvanizado
Diámetro exterior

3.6mm

Estructura

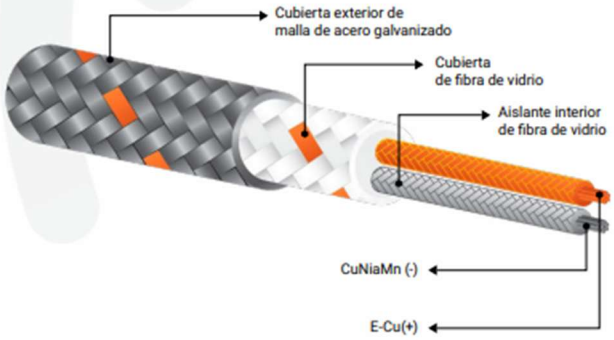


Figura 61. Ficha térmica cable tipo S

FICHA TÉCNICA
09/06/2026

Indutécnica®
SOLUCIONES INDUSTRIALES

MODELO: TET810

CATEGORÍA: TEMPERATURA

TCS TET810. 0,35mm. Simple. Loza. Alumina 10x400 mm. Sin Rosca. Cuello Recto 316. 31,7x40mm.

DESCRIPCIÓN TÉCNICA:

- **Modelo: TET810** - Termocupla Vaina Cerámica
- Tipo de Sensor: Termocupla S - Termoalambre 0.35mm
- Numero de Elementos: Simple / conexión 2 hilos
- Loza de Conexión: Loza Cerámica
- Tipo de Cabezal: Aluminio - Grande
- Cuello: Cuello Recto Acero inoxidable SS304 Diam: 31.7mm Largo: 040 mm
- Material del Bulbo: Alumina KER 799
- Diámetro del Bulbo: 10mm
- Conexión a Proceso: Sin conexión a proceso
- Largo de Inserción 'U': 0400 mm

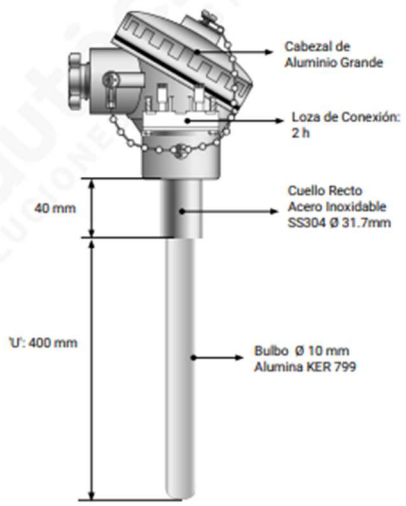


*IMAGEN REFERENCIAL SÓLO PARA FINES EXPLICATIVOS Y FUNCIONALES

Figura 62. Ficha técnica termocupla tipo S

REFERENCIAS

[1] WARNER BROTHERS FOUNDRY COMPANY, «THE HISTORY OF METAL CASTING,» 2021. [En línea]. Available: https://www.wbcastings.com/blog/metal-casting-history/.

[2] ELECTROHEAT INDUCTION, «Tipos de hornos de fundición para metales,» 07 Mayo 2024. [En línea]. Available: https://electroheatinduction.com.mx/tipos-de-hornos-de-fundicion/.

[3] C. S. Calvo, «HORNOS UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE,» *Scientia ISSN 1993-422X ,* vol. XVII, nº 17, p. 18, 2015.

[4] ELECTROHEAT INDUCTION, «¿Qué es un horno de inducción y cuales son sus funciones?,» 21 Noviembre 2013. [En línea]. Available: https://electroheatinduction.com.mx/que-es-un-horno-de-induccion/.

[5] JINSUN CARBON, «Horno de arco eléctrico: todo lo que necesita saber,» 25 Noviembre 2024. [En línea]. Available: https://jinsuncarbon.com/es/horno-de-arco-electrico/.

[6] schmelzofenkonzepte, «alternative_schmelzofenkonzepte_spanish,» Marzo 2021. [En línea]. Available: https://nabertherm.com/sites/default/files/2021-03/alternative_schmelzofenkonzepte_spanish.pdf.

[7] Nabertherm, «foundry_english nabetherm.pdf,» [En línea]. Available: https://nabertherm.com/es/productos/industria/fundicion.

[8] BICSA, «HORNOS DE CRISOL: VENTAJAS, DESVENTAJAS Y APLICACIONES EN LA INDUSTRIA MODERNA,» 2025. [En línea]. Available: https://www.briteg.com/articulos-del-blog/hornos-de-crisol-ventajas-desventajas-y-aplicaciones-en-la-industria-moderna.

[9] Heeger Materials Inc, «Heegermaterials,» [En línea]. Available: https://heegermaterials.com/blog/260_Different-types-of-crucibles--A-complete-guid.html.

[10] “. d. u. h. b. a. d. c. u. c. d. 6. k. d. c. f. p. l. U. T. d. M. m. u. d. s. l. J. J. Angamarca Puma y G. F. Tenelema Yánez, «BIBDIGITAL,» 05 2022. [En línea]. Available: https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22746.

[11] RAPID DIRECT, «¿Qué es el metal no ferroso? Descripción detallada,» 11 Septiembre 2022. [En línea]. Available: https://www.rapiddirect.com/es/blog/what-is-non-ferrous-metal/.

[12] M. P. Groover, Fundamentos de manufactura, McGraw-Hill.

[13] metals4U, «Metales ferrosos: propiedades, ejemplos y aplicaciones.,» [En línea]. Available: https://www.metals4u.co.uk/blog/ferrous-metals.

[14] Y. A. ÇENGEL, Transferencia de calor y masa CUARTA EDICIÓN, Mc Graw Hill.

[15] G. E. Dieter y L. C. Schmidt, Engineering Design, McGraw-Hill Education, 2012.

[16] 纪庆锴黄可南, «Energy-saving electric crucible furnace». China Patente CN203668200U, 07 01 2014.

[17] 黄正俊, «Resistance type melting crucible furnace». China Patente CN201828139U, 12 10 2010.

[18] 翟慧玲张卫军张滨, «Automatic temperature control system of annealing furnace». China Patente CN201828840U, 14 09 2010.

[19] A. Waugh, «Double wall fast cool-down furnace». United States Patente US4802441A, 08 01 1987.

[20] W. Fadler, «Metallurgical furnace construction». United States Patente US3486745A, 16 02 1967.

[21] Veto, «CONTROLADOR TEMPERATURAS EN PERFILES TÉRMICOS PROGRAMABLES,» [En línea]. Available: https://www.veto.cl/controlador-de-temperatura-en-perfiles-termicos-programables-g3401081/p.

[22] CV International / Cerâmica Corona, «Catálogo Técnico - Crisoles de Carburo de Silicio,» 4 10 2013|. [En línea]. Available: https://cvinternational.com.pe/product/crisoles-de-carburo-de-silicio/.

[23] LAUREL-ICCH, «LADRILLO AISLANTE K-23/26/30,» [En línea]. Available: https://comercialchile.cl/wp-content/uploads/2021/05/FT-Ladrillo-K23-26-30-icch.pdf.

[24] KANTHAL, «CÁLCULOS DE DISEÑO,» 29 Julio 2025. [En línea]. Available: https://www.kanthal.com/es-es/knowledge-hub/heating-material-

knowledge/c%C3%A1lculos-de-dise%C3%B1o-y-tolerancias-est%C3%A1ndar/c%C3%A1lculos-de-dise%C3%B1o/.

[25] KANTHAL, «RESISTANCE HEATING ALLOYS AND SYSTEMS FOR INDUSTRIAL FURNACES,» [En línea]. Available: https://www.kanthal.com/es-es/productos/productos-para-hornos/elementos-de-calentamiento/elementos-de-calentamiento-met%C3%A1licos/#tab-downloads.

[26] Industrial Comercia Chile, FIBRA CERAMICA MANTA. [En línea]. Available: https://comercialchile.cl/wp-content/uploads/2023/12/FT-Fibra-Ceramica-MANTA-icch.pdf.

[27] Industrial Comercial Chile, «FIBRA CERAMICA PLACA,» [En línea]. Available: https://comercialchile.cl/wp-content/uploads/2023/12/FT-Fibra-Ceramica-PLACA1-icch.pdf.

[28] Shandong Topower Pte Ltd, «Ceramic Fiber Board,» [En línea]. Available: https://www.tprefractory.com/insulation-thermal-material/ceramic-fiber-board.html.

[29] Shandong Topower Pte Ltd, «Ceramic Fiber Blanket for Klin and Furnace Insulation,» [En línea]. Available: https://www.tprefractory.com/insulation-thermal-material/ceramic-fibre-blanket.html.

[30] Xintai Refractory, «Ladrillos refractarios aislantes K26,» [En línea]. Available: https://xintairefractory.com/es/product/k26-insulating-fire-bricks/.

[31] KARTHAL, «KANTHAL® A-1 ALAMBRE DE CALENTAMIENTO POR RESISTENCIA Y ALAMBRE DE RESISTENCIA,» [En línea]. Available: https://www.kanthal.com/es-es/productos/datasheets/fichas-t%C3%A9cnicas-de-materiales/hilo/alambre-de-calentamiento-por-resistencia-y-alambre-de-resistencia/kanthal-a-1/.

[32] KANTHAL, «KANTHAL® APM ALAMBRE DE CALENTAMIENTO POR RESISTENCIA Y ALAMBRE DE RESISTENCIA,» [En línea]. Available: https://www.kanthal.com/es-es/productos/datasheets/fichas-t%C3%A9cnicas-de-materiales/hilo/alambre-de-calentamiento-por-resistencia-y-alambre-de-resistencia/kanthal-apm/.

[33] CarrboSystem, «Industrial furnaces,» [En línea]. Available: https://carbosystem.com/en/tipos-de-hornos-industriales/.

[34] M. G. [CN] y D. G. [CN], «Box type electric resistance furnace». China Patente CN2182971Y, 16 11 1994.

[35] W. LIANGCHENG y Z. LEI, «Box-type industrial resistance furnace». China Patente CN210198080U, 25 03 2020.