

DISEÑO DE UN HORNO POR INDUCCIÓN PARA PRÁCTICAS EN
LABORATORIO

WENDY STEPHANIA MEJIA SILVA
GINA FERNANDA VILLALOBOS BAQUERO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERIA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2019

DISEÑO DE UN HORNO POR INDUCCIÓN PARA PRÁCTICAS EN
LABORATORIO

WENDY STEPHANIA MEJIA SILVA
GINA FERNANDA VILLALOBOS BAQUERO

Proyecto integral de grado optar el título de:
INGENIERO MECÁNICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2019

Nota de aceptación:

Ing. Víctor Raúl González.
Presidente del Jurado

Ing. Oscar Chamarraví.
Jurado 1

Ing. Eric Fabien Navarro.
Jurado 2

Bogotá D.C., febrero de 2.019

DIRECTIVAS DE LA FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Ingeniería Mecánica

Ing. Carlos Mauricio Veloza Villamil

Las directivas de la Universidad América los jurados calificadores y el cuerpo de docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

Dedicatoria

A Dios por darme la oportunidad de cumplir mi sueño de ser ingeniero mecánico, por regalarme una familia y amigos maravillosos, a mis padres Lupe Silva, Guillermo Mejía por su comprensión y apoyo incondicional durante este proceso, por enseñarme que no hay cosas imposibles, a mis Hermanas Paola Mejía y Sindy Mejía por darle a mi vida un matiz especial, siendo mi guía, ejemplo a seguir y por darme todo su amor, a mi compañera de tesis que a través de los años universitarios fortalecimos una gran amistad y siempre estuvo presente en mi formación como profesional y finalmente a todos aquellos amigos que me ayudaron en este maravilloso camino.

Wendy Stephania Mejía Silva.

Al culminar con éxito esta tesis que con esfuerzo y dedicación he logrado, viene a mi memoria todo lo recorrido hasta hoy y hago un alto en el camino para agradecer en primer lugar a Dios por bendecirme y brindarme la sabiduría necesaria para guiarme en este proyecto, a mis padres Rafael Villalobos y Claudia Baquero quienes con su ejemplo y amor son mi soporte en cada uno de los pasos importantes que doy y especialmente por el apoyo incondicional en esta etapa educativa. A mi hermana por su amor, su paciencia y colaboración en cada momento duro de este proceso. A mis abuelos, quienes con su amor y consejos son pilar esencial desde el inicio hasta el final en esta etapa. A mis familiares, que estuvieron pendientes del proceso académico. A mi compañera de tesis por trabajar conmigo hombro a hombro en cada etapa de este proyecto, y ser también una amiga incondicional a nivel personal. A mis compañeros de carrera quienes aportaron su granito de arena para culminar con este proyecto.

Gina Fernanda Villalobos Baquero.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a:

La Fundación Universidad de América por habernos dado la oportunidad de vincularnos a la facultad de ingeniería mecánica, brindándonos una excelente formación integral en la parte técnica y humanística.

Al Ingeniero Víctor Raúl González, director del proyecto, por sus aportes y orientación con el desarrollo de este trabajo.

A IEPF S.A.S por brindarnos los recursos técnicos y la información necesaria que se requería para complementar el proyecto.

A toda la planta de profesores de la facultad por la contribución a nuestro desarrollo personal y profesional.

A todas aquellas personas que de una u otra forma hicieron posible la culminación de este proyecto.

A todas estas personas muchas gracias...

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO	19
1.1 HORNO POR INDUCCIÓN	19
1.1.1 Descripción de funcionamiento	20
1.1.2 Partes del horno	21
1.2 TIPOS DE HORNOS POR INDUCCIÓN	22
1.2.1 Hornos por inducción sin núcleo (media o alta frecuencia)	23
1.2.2 Hornos por inducción de canal (baja frecuencia)	24
1.3 MATERIALES DE CARGA	25
1.3.1 Cobre (Cu)	25
1.3.2 Bronce (Aleación Cu y Sn)	26
1.3.3 Latón (Aleación Cu y Zn)	27
1.4 TIPOS DE CRISOL	30
1.4.1 Clasificación según el tipo de material	30
1.4.2 Clasificación de acuerdo con su forma	31
2. PARÁMETROS Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	34
2.1 UBICACIÓN	34
2.2 REQUERIMIENTOS FUNCIONALES	35
2.2.1 Materiales de carga	35
2.2.2 Capacidad del material de carga	37
2.2.3 Temperatura de operación	37
2.2.4 Tiempo de calentamiento	37
2.2.5 Fuente de energía	37
3. PLANTEAMIENTO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO	38
4. DISEÑO CONCEPTUAL	42
4.1 SUBSISTEMA DE CARGA	42
4.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN	42
4.3 FUENTE DE PODER	42
4.4 SUBSISTEMA DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO	43
4.5 SUBSISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA	44
4.6 SUBSISTEMA DE DESCARGA	44
5. DISEÑO DETALLADO	46
5.1 CRISOL	46
5.2 BOBINA INDUCTORA	50

5.2.1 Cobre	59
5.2.2 Bronce	61
5.2.3 Latón	62
5.3 FUENTE DE PODER	63
5.3.1 Transformador reductor	65
5.4 SISTEMA DE REFRIGERACION	66
5.5 BUSBAR	73
5.6 SELECCIÓN DEL CONTROL DE TEMPERATURA	73
5.6.1 Termopar	74
5.6.2 Controlador de temperatura	75
5.7 SOLDADURA	75
5.7.1 Ensamble de la carcasa del horno mediante soldadura	76
5.7.2 Consumo de soldadura para el ensamble de la carcasa del horno por inducción	77
5.7.3 Consumo para la carcasa del cuerpo y tapa del horno	79
5.7.4 Consumo para la platina-porta tornillo que se ubica en el cuerpo	81
5.7.5 Consumo para la platina-porta tornillo que se ubica en la tapa	81
5.7.6 Consumo para la parte inferior de la base	82
5.7.7 Consumo para los laterales de la base	83
5.7.8 Consumo para la parte superior de la base del horno	84
5.7.9 Consumo total de soldadura	85
5.8 TRANSFERENCIA DE CALOR	85
5.8.1 Selección de los aislantes	86
5.8.2 Selección de la carcasa	87
5.8.3 Cálculo de temperaturas por resistencias en paredes cilíndricas	88
5.9 PINZAS DE LABORATORIO	93
5.10 PESO Y DIMENSIONES DEL HORNO	94
6. MANUALES	95
6.1 MANUAL DE OPERACIÓN	95
6.2 MANUAL DE MANTENIMIENTO	98
6.2.1 Mantenimiento del crisol	98
6.2.2 Mantenimiento de la bobina	99
6.2.3 Mantenimiento de acoples eléctricos	99
6.2.4 Mantenimiento de la termocupla	99
6.2.5 Mantenimiento de la carcasa	99
6.2.6 Actividades de mantenimiento	100
6.3 MANUAL DE ENSAMBLE.	100
6.4 MANUAL DE SEGURIDAD	107
7. EVALUACION FINANCIERA	112
7.1 COSTO DEL DISEÑO DE UN HORNO POR INDUCCION, MATERIA PRIMA Y MANO DE OBRA PARA SU REALIZACION.	112
7.2 PRECIO DE VENTA DE UN HORNO DE INDUCCION FABRICADO	115

8.ANÁLISIS AMBIENTAL	116
8.1 IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES	116
8.2 EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES	117
9.CONCLUSIONES	119
10.RECOMENDACIONES	120
BIBLIOGRAFIA	121
ANEXOS	124

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Horno por inducción industrial	19
Imagen 2. Sistema básico de calentamiento de inducción	20
Imagen 3. Efecto de la frecuencia en el material	21
Imagen 4. Partes que componen un horno por inducción	22
Imagen 5. Horno por inducción sin núcleo	23
Imagen 6. Horno por inducción de canal	24
Imagen 7. Cobre comercial	25
Imagen 8. Bronce 90%Cu-10%Sn	26
Imagen 9. Latón 70%Cu-30%Zn	27
Imagen 10. Dimensiones requeridas para el material de carga en mm	29
Imagen 11. Crisol de grafito arcilla	30
Imagen 12. Crisol Tipo A	31
Imagen 13. Crisol Tipo KF	32
Imagen 14. Crisol Tipo B	32
Imagen 15. Crisol Tipo BU	33
Imagen 16. Dimensiones del laboratorio	34
Imagen 17. Dimensiones del laboratorio	34
Imagen 18. Diseño de alternativa 1	39
Imagen 19. Diseño de alternativa 2	40
Imagen 20. Diseño de alternativa 2	40
Imagen 21. Subsistemas del equipo	42
Imagen 22. Perfiles de bobinas	43
Imagen 23. Tipos de termocuplas	44
Imagen 24. Representación de sistema de descarga	45
Imagen 25. Crisol de ranura superior	46
Imagen 26. Crisol de ranura superior en mm	50
Imagen 27. Funcionamiento de transformadores monofásicos	51
Imagen 28. Pieza de carga en un campo magnético	53
Imagen 29. Capacidades y potencias de los hornos de inducción	55
Imagen 30. Catálogo de embobinados	60
Imagen 31. Fuente de poder suministrada por IEPF S.A.S	64
Imagen 32. Fuente de poder suministrada por IEPF S.A.S	65
Imagen 33. Transformador reductor	66
Imagen 34. Esquema de refrigeración en la bobina	67
Imagen 35. Manguera libre de carbono	73
Imagen 36. Termocupla tipo s	74
Imagen 37. Controlador de temperatura Autonics	75
Imagen 38. Proceso de soldadura	76
Imagen 39. Soldadura MIG	77
Imagen 40. Esquema de chaflán de soldadura (lados iguales)	78
Imagen 41. Cerámico de cuarzo	86

Imagen 42. Manta cerámica	87
Imagen 43. Carcasa	87
Imagen 44. Representación de distribución de las resistencias térmicas en las paredes cilíndricas que componen el horno.	90
Imagen 45. Manipulación de crisoles mediante pinzas	93
Imagen 46. Dimensiones de las pinzas	94
Imagen 47. Posicionamiento del material	96
Imagen 48. Tablero de control	97
Imagen 49. Botón de apagar	97
Imagen 50. Pinzas de extracción del crisol	98
Imagen 51. Posibles fallas del crisol	99
Imagen 52. Acople de apoyos del Horno	101
Imagen 53. Acople de la Fuente de poder	101
Imagen 54. Acople de la Carcasa del tablero eléctrico	102
Imagen 55. Acople de los botones de mando	102
Imagen 56. Acople de la Rejilla de ventilación	103
Imagen 57. Acople de la Termocupla	103
Imagen 58. Acople de la carcasa de la Bobina	104
Imagen 59. Manta cerámica	104
Imagen 60. Acople de la Bobina	105
Imagen 61. Acople del refrigerante y fuente de poder a la bobina	105
Imagen 62. Acople Cerámico	106
Imagen 63. Acople de la tapa	106
Imagen 64. Simbología de advertencia	107
Imagen 65. Guantes aluminizados	108
Imagen 66. Careta de seguridad	109
Imagen 67. Traje aluminizado	109
Imagen 68. Mascarilla auto filtrante	110

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades del cobre Cu	35
Tabla 2. Propiedades del bronce	36
Tabla 3. Propiedades del latón	36
Tabla 4. Scoring para hornos por inducción	38
Tabla 5. Dimensiones de crisoles de acuerdo a su capacidad	48
Tabla 6. Frecuencia requerida por el cobre	58
Tabla 7. Frecuencia requerida por el bronce	58
Tabla 8. Frecuencia requerida por el latón	58
Tabla 9. Calor global generado con el cobre	70
Tabla 10. Calor global generado con el bronce	70
Tabla 11. Calor global generado con el latón	71
Tabla 12. Datos de entrada para cálculo de consumo	79
Tabla 13. Consumo de soldadura en cuerpo y tapa del horno	80
Tabla 14. Consumo de soldadura para la platina-porta tornillo ubicada en el cuerpo	81
Tabla 15. Consumo de soldadura para la platina-porta tornillo ubicada la tapa	81
Tabla 16. Consumo de soldadura para la parte inferior de la base de horno	82
Tabla 17. Consumo de soldadura de los laterales de la base del horno	83
Tabla 18. Consumo de soldadura de los laterales de la base del horno	84
Tabla 19. Consumo total de soldadura	85
Tabla 20. Calor global para el cobre	88
Tabla 21. Calor global para el bronce	89
Tabla 22. Calor global para el latón	89
Tabla 23. Costo desarrollo del diseño	112
Tabla 24. Costo de materia prima del diseño de un horno por inducción	113
Tabla 25. Costo mano de obra	114
Tabla 26. Costo total del proyecto	114
Tabla 27. Cotización Horno por inducción IEPF S.A.S	115
Tabla 28. Impactos ambientales	116
Tabla 29. Evaluación del impacto ambiental	117

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Proceso de funcionamiento	95
Cuadro 2. Actividades de mantenimiento	100

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Catalogo bobina inductora de cobre	125
Anexo B. Sistema de refrigeración tipo chiller	126
Anexo C. Carbon free hose pipe	127
Anexo D. Termocupla tipo s	128
Anexo E. Ficha técnica manta cerámica	129
Anexo F. Pinzas sujetadoras	130
Anexo G. Fuente de poder	131

RESUMEN

A través del tiempo la Fundación Universidad de América ha venido dotando los laboratorios para brindar y afianzar conocimientos teórico-prácticos, en la actualidad no se dispone de un horno por inducción para la fundición de metales no ferrosos, el poder implementar este equipo en los laboratorios de la Universidad permitiría realizar las prácticas necesarias para fortalecer y adquirir experiencia en el manejo, entendimiento de los distintos procesos que se le pueden realizar a los metales no ferrosos.

En este proyecto se realizó el diseño de un horno por inducción para fundición de materiales no ferrosos específicamente latón, cobre y bronce aplicando la técnica de calentamiento por inducción electromagnética. Para ello se tuvo en cuenta la teoría desglosada por Faraday, ampere y las leyes electromagnéticas que gobiernan el fenómeno de la corriente eléctrica, el principal elemento y más importante del horno es la bobina inductora, se diseñó teniendo en cuenta los parámetros magnéticos y capacidades eléctricas que permitieron determinar el número de vueltas, corrientes eléctricas circulantes, calibres del conductor, sistema de refrigeración y potencia disipada.

Para determinar el crisol se tuvo en cuenta la capacidad requerida por el material de carga, la temperatura de operación del horno, y que permitiera el fácil vertimiento de la pieza fundida brindando seguridad y funcionalidad en la operación de extracción.

Se seleccionaron los componentes eléctricos y electrónicos; inversores, capacitores, inductores, rectificadores, variadores de frecuencia, entre otros, que conforman la fuente de poder y que son necesarios para producir el voltaje, la corriente, la potencia y la alta frecuencia requerida en el proceso.

PALABRAS CLAVES: Bobinas, Cobre, Aleaciones de cobre, fundición, horno, inducción, metales no ferrosos.

INTRODUCCIÓN

El horno por inducción será un equipo que complementará la formación, aprendizaje y práctica para los futuros ingenieros en el área de la fundición de metales no ferrosos, siendo apoyo para la consolidación de los conocimientos teórico-prácticos en las pruebas de fundición. Con este equipo al servicio del laboratorio, la Universidad dará un paso importante en la calidad, desarrollo y reconocimiento de los Programas de Ingeniería.

Es necesario realizar prácticas para afianzar los conocimientos en el aprendizaje. Para este caso en particular, espacios académicos de Ingeniería de Materiales, Caracterización de los Materiales, Tratamientos Térmicos, Procesos I y Procesos II, correspondientes al plan de estudios del programa de Ingeniería Mecánica de la Fundación Universidad de América.

Dicho lo anterior, el objetivo principal de este proyecto es **“El diseño de un horno por inducción para prácticas de laboratorio”**.

Para cumplir con el objetivo principal es necesario llevar a cabo los siguientes objetivos específicos:

- Definir los metales no ferrosos con los cuales trabajará el horno por inducción.
- Seleccionar el tipo de horno por inducción a diseñar.
- Establecer los requerimientos funcionales y los parámetros de diseño del horno.
- Desarrollar el diseño detallado del horno por inducción.
- Realizar los planos de fabricación del horno.
- Desarrollar los manuales de operación y mantenimiento del horno por inducción.
- Evaluar el impacto ambiental del horno por inducción.
- Hacer el análisis financiero del proyecto.

Durante el desarrollo de este proyecto se debe tener en cuenta una capacidad de 2 kg, los (3) materiales de carga a seleccionar tendrán como máxima temperatura de fusión 1200°C, el horno contará con un sistema automático de control de temperatura, no se realizarán guías de laboratorio, no se fabricará ni se realizará ningún prototipo, el sistema de carga y apertura del horno será manual.

En el primer capítulo se explica los tipos de hornos por inducción existentes, incluyendo los materiales de carga a fundir y los diferentes tipos de crisoles con sus múltiples clasificaciones.

El segundo capítulo pone en contexto los parámetros y requerimientos a los que estará sometido el diseño del horno como; la ubicación, el espacio disponible en el

laboratorio, tiempo de funcionamiento del horno, temperaturas y las condiciones de punto cero.

En el tercer capítulo se planteó y seleccionó que tipo de horno por inducción a diseñar.

El cuarto capítulo especifica los subsistemas involucrados en el diseño del horno por inducción, contemplando desde el subsistema de carga, fuente de alimentación, fuente de poder, subsistema de calentamiento, subsistema de control de temperatura hasta el subsistema de descarga.

En el quinto capítulo se diseñó y se realizó los cálculos de la bobina inductora, del crisol, fuente de poder, sistema de refrigeración, pinzas de laboratorio, selección de la manguera libre de carbono, sistema de control de temperatura.

El sexto capítulo indica los pasos desde el encendido, funcionamiento, hasta el apagado del horno, teniendo en cuenta especificaciones para la inspección del equipo, también en este apartado se explica los procedimientos para el correcto ensamble.

En el séptimo capítulo se realizó una tabla comparativa entre los costos del diseño y el costo de un horno comercial.

El octavo capítulo evalúa el impacto ambiental que genera la fabricación y el uso del horno por inducción.

1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

1.1 HORNO POR INDUCCIÓN

La generación de calor es un proceso que tiene diferentes finalidades industriales, desde endurecer, unir, crear aleaciones y hasta fundir un metal, este proceso de transformación de materia prima se debe manejar a una atmósfera controlada y en un ambiente libre de oxígeno, los equipos que se utilizan para estos tipos de procesos son los hornos de calentamiento, que se clasifican de la siguiente manera: Hornos por inducción, crisoles, hornos eléctricos, cubilotes y hornos de combustible directo. En este proyecto se trabajará en el diseño de un horno por inducción, en la imagen 1, se puede apreciar un ejemplo de un horno por inducción a nivel industrial.

Imagen 1. Horno por inducción industrial



Fuente: ASTIGARRAGA URQUIZA, Julio y AGUIRRE ORMAZA, José Luis. Hornos industriales de inducción. Primera edición. México. Mc Graw Hill, 1999. 12 p.

Los hornos por inducción poseen ciertas ventajas y limitaciones las cuales los hacen únicos y eficientes. Entre las ventajas más relevantes están:

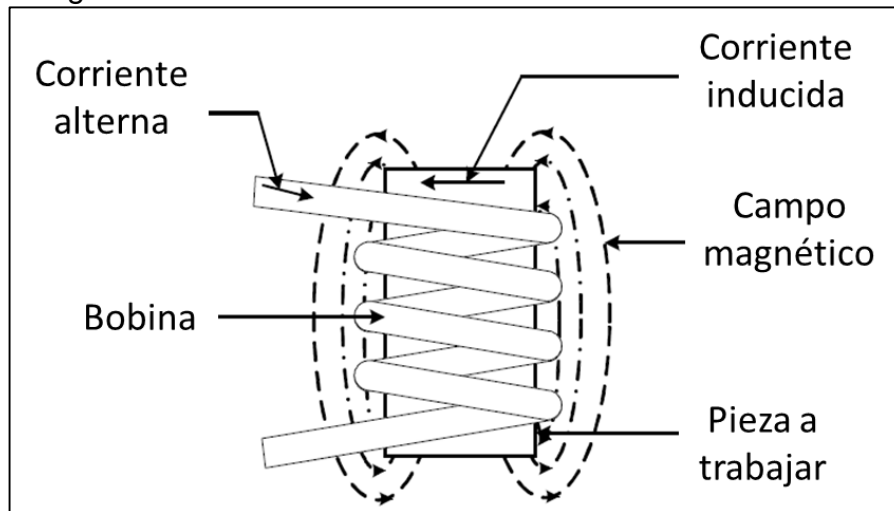
- El calor se genera en el seno mismo de la carga.
- La inercia térmica de los equipos es muy reducida.

- La potencia específica es elevada, lo que origina una gran rapidez de calentamiento¹.

1.1.1 Descripción de funcionamiento. Los hornos por inducción funcionan mediante un principio físico en el que fluye corriente alterna a través de una bobina de cobre por donde circulan los electrones en dirección de la carga eléctrica generando un campo magnético, de acuerdo con la ley de Faraday – Lenz, este campo magnético induce flujo de corrientes parasitas más conocidas como de Foucault las cuales provocan disipación de calor, adicionalmente este campo magnético genera el fenómeno de histéresis que causa vibración y fricción en las moléculas del material bajo el flujo de corriente alterna, este principio es denominado efecto Joule.

Cuando una pieza es sometida a la acción del campo magnético producido por una bobina, las corrientes fluyen en sentido contrario a la resistividad eléctrica del material generando calor únicamente en el área que ha sido expuesta al campo magnético. Como se muestra en la imagen 2.

Imagen 2. Sistema básico de calentamiento de inducción



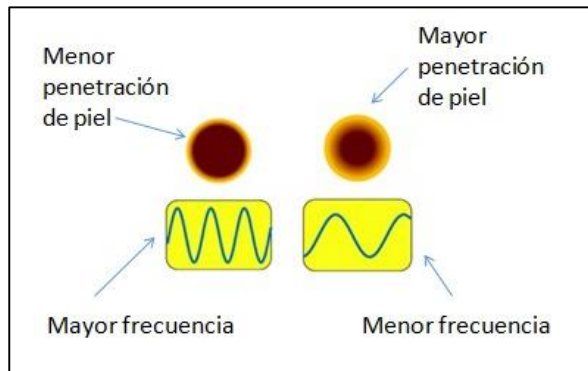
Fuente: WORLD ACADEMY OF SCIENCE. Design calculation and performance testing of heating coil in induction surface hardening machine. [citado: 6 de noviembre del 2008]. Disponible en: <https://waset.org/publications/13504/design-calculation-and-performance-testing-of-heating-coil-in-induction-surface-hardening-machine>.

Gracias al campo electromagnético inducido que se genera en la pieza, surge el fenómeno llamado “efecto piel”, el cual consiste en corrientes que fluyen por la superficie del material. La penetración de la corriente en la superficie depende de la

¹ ASTIGARRAGA URQUIZA, Julio y AGUIRRE ORMAZA, José Luis. Hornos industriales de inducción. Primera edición. México. Mc Graw Hill, 1999. p. 6.

frecuencia de la corriente inductora, en cuanto mayor sea la frecuencia de trabajo, menor es la profundidad de la piel, cuanto menor sea la frecuencia de trabajo mayor es la profundidad de la piel y la penetración del efecto de calentamiento², como se puede observar en la imagen 3.

Imagen 3. Efecto de la frecuencia en el material



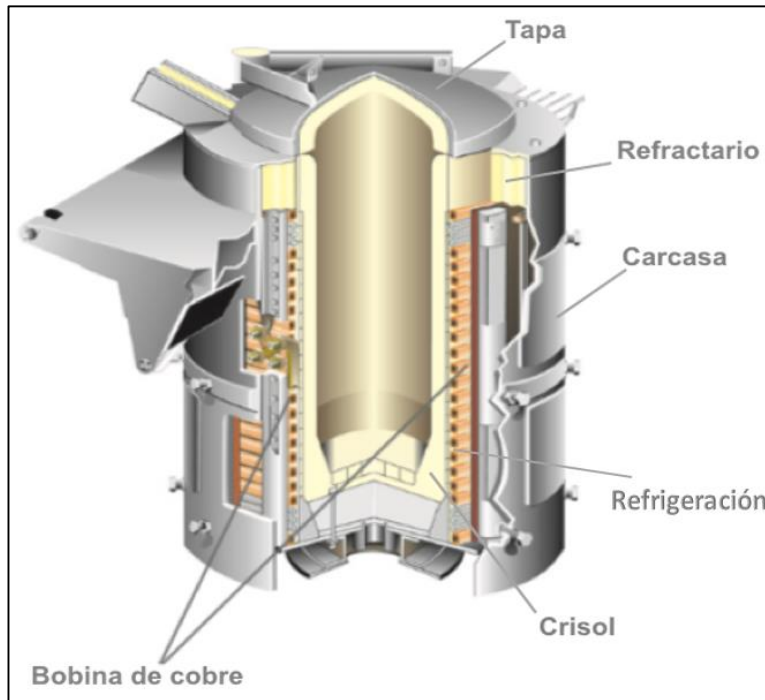
Fuente: INDUCTOTHERM. Que es inducción. [citado: 13 de abril del 2002]. Disponible en: <https://inductothermmexico.com/what-is-induction/>.

Estos hornos necesitan una frecuencia de operación superior a 50 Hz, para acelerar los electrones en el material a fundir el fenómeno llamado “corrientes de Eddy”, encargado de calentar el material hasta alcanzar su temperatura de fusión, la bobina es el elemento más importante, ya que es la encargada de entregar la energía necesaria para lograr dicho proceso, para preservar la vida útil de la bobina se debe tener en cuenta un sistema de enfriamiento por que las corrientes que fluyen a través de ella pueden ocasionar daños debido a las altas temperaturas a las que pueden llegar a operar.

1.1.2 Partes del horno. Las partes que componen un horno por inducción se listan a continuación y se pueden observar en la imagen 4.

² AMBRELL. Acerca de inducción calentamiento. [citado: 15 de febrero de 2018]. Disponible en: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/508263/Ambrell_PDFs/411-0169-16.pdf?t=1477689127410.

Imagen 4. Partes que componen un horno por inducción



Fuente: INDUCTOTHERM. Guía de fundamentos de seguridad en la fundición por inducción que puede salvar su vida. [citado: 18 de enero de 2011]. Disponible en: <https://code.inductotherm.com/06%20Resources/Safety/M2573%20Rev%202.pdf>.

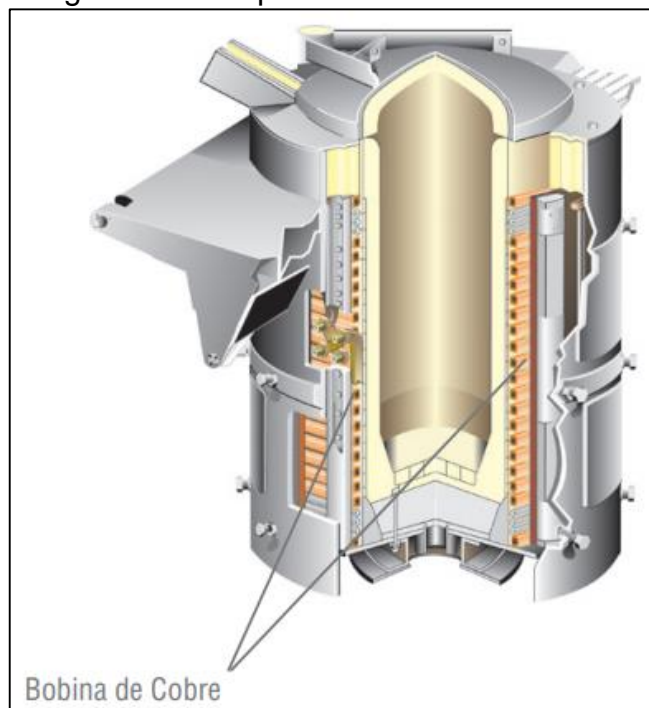
- Carcasa: está construida de acero o aluminio resistente para proteger la bobina durante la operación del horno.
- Tapa: elemento que minimiza las pérdidas de calor.
- Refractario: barrera de aislamiento eléctrico y térmico.
- Crisol: pieza utilizada para contener materiales y ser expuestos a altas temperaturas.
- Bobina de cobre: elemento que permite el flujo de electrones para generar un campo magnético.
- Refrigeración: elemento que permite conservar la temperatura de la bobina a condiciones ideales de trabajo evitando daños en sus propiedades física.

1.2 TIPOS DE HORNOS POR INDUCCIÓN

En el proceso de fundición por inducción se encuentran dos tipos de hornos:

1.2.1 Hornos por inducción sin núcleo (media o alta frecuencia). Este tipo de horno no cuenta con un núcleo magnético o inductor, cuenta con un revestimiento refractario encargado de proteger la bobina de cobre, ya que la corriente eléctrica que circula por ella es considerablemente alta, el refractario permite que el campo magnético le atravesase haciendo que la carga metálica, contenida en él, se funda. Adicionalmente en este tipo de horno se protege la bobina de las altas temperaturas haciendo fluir agua por el interior de la bobina para su refrigeración. Son hornos que se utilizan en aplicaciones que requieren una fundición más rápida de la aleación o cuando es necesario variar las frecuencias de acuerdo con las aleaciones a fundir. En la imagen 5 se muestra un horno industrial de este tipo.

Imagen 5. Horno por inducción sin núcleo

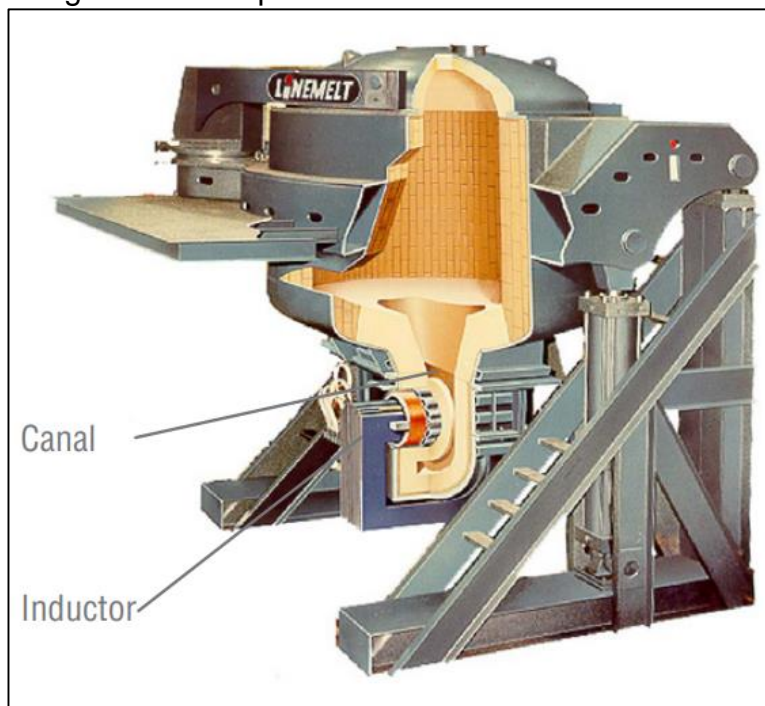


Fuente: INDUCTOTHERM. Guía de fundamentos de seguridad en la fundición por inducción que puede salvar su vida. [citado: 18 de enero de 2011]. Disponible en: <https://code.inductotherm.com/06%20Resources/Safety/M2573%20Rev%202.pdf>.

Trabajan a frecuencias mayores 200 Hz, se utilizan para la fusión de todo tipo de metales tanto ferrosos como no ferrosos, sus aplicaciones pueden ser en áreas de laboratorio o a nivel industrial para diferentes tipos de tratamientos térmicos.

1.2.2 Hornos por inducción de canal (baja frecuencia). En estos hornos el proceso de calentamiento se realiza en un canal cuya área es pequeña y estrecha en la parte inferior del horno, este canal pasa a través de un núcleo de acero laminado alrededor de la bobina, la cual es energizada cuando el canal está lleno del material a fundir, el circuito eléctrico, bobina corriente produce un campo electromagnético intenso originando el calentamiento del metal. Este tipo de hornos se utilizan para mantener y distribuir el metal fundido, el vaciado del horno solo se realiza cuando se debe cambiar el recubrimiento refractario, siendo útil para fundiciones pequeñas con requisitos especiales, para grandes bastidores y para procesos de fundición y moldeo. En la imagen 6 se muestra un ejemplo de este tipo de horno.

Imagen 6. Horno por inducción de canal



Fuente: INDUCTOTHERM. Guía de fundamentos de seguridad en la fundición por inducción que puede salvar su vida. [citado: 18 de enero de 2011]. Disponible en: <https://code.inductotherm.com/06%20Resources/Safety/M2573%20Rev%202.pdf>.

En este tipo de horno se trabaja a frecuencias entre 50 a 200 Hz con baja potencia, son utilizados en su mayoría para la fusión, el mantenimiento y sobrecalentamiento de los metales no ferrosos y sus diferentes aleaciones.

1.3 MATERIALES DE CARGA

De acuerdo con los requerimientos por parte de la universidad, se establecieron que los materiales de carga deben ser cobre, latón y bronce, materiales que se clasifican dentro de los metales no ferrosos.

1.3.1 Cobre (Cu). El cobre es un metal no ferroso que se puede encontrar en la naturaleza de forma mineral, con un característico color rojizo, el cual presenta buenas propiedades mecánicas como los son la ductilidad y la maleabilidad, permitiendo facilidad al momento de trabajarlo, también es un buen conductor de calor y de electricidad. Es uno de los materiales que presenta alta conductividad eléctrica y térmica, gracias a las anteriores propiedades es un material comúnmente usado en diferentes aplicaciones e industrias, estas aplicaciones varían desde componentes de equipos electrónicos, componentes automotrices, hasta componentes de la industria de la construcción. Su resistencia a la corrosión es alta en la mayoría de los medios, pero se pueden mejorar mediante aleaciones, su temperatura de fusión es de 1083,4 °C. En la imagen 7 se puede observar las varillas comerciales de cobre.

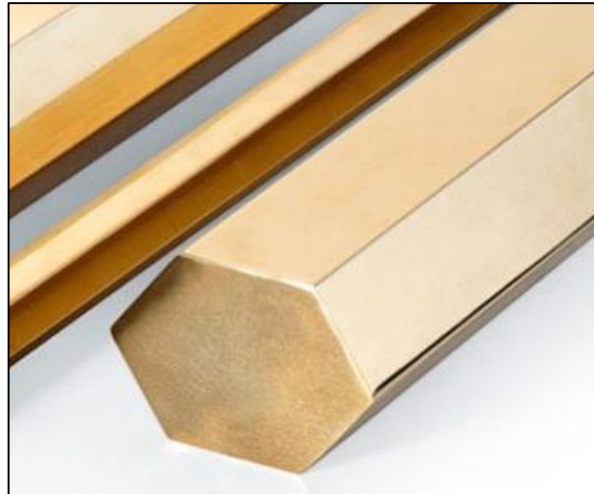
Imagen 7. Cobre comercial



Fuente: TIANGANG. Varilla de cobre. [citado: 30 de marzo de 2010] Disponible en: https://es.made-in-china.com/co_tjtgwy/product_Pure-Copper-Ground-Rod-Copper-Ground-Rod_hornigyhy.html.

1.3.2 Bronce (Aleación Cu y Sn). El bronce es una aleación de cobre y estaño, esta aleación es más resistente que el latón, presentando un amplio espectro de propiedades y composiciones, son de gran resistencia a la corrosión y resistencia a la tracción, su maquinabilidad es baja y su temperatura de fusión es de (850-1000) °C dependiendo su composición química. Su aplicación se encuentra en placas de expansión para puentes, discos de embrague, entre otros. El porcentaje de composición química asignado por parte de la universidad, teniendo en cuenta sus propiedades y su alta comercialización a nivel industrial fue un porcentaje de (90%Cu – 10%Sn), de acuerdo con esta característica a nivel normativo internacionalmente el código de identificación corresponde a C52400. Como se observa en la imagen 8.

Imagen 8. Bronce 90%Cu-10%Sn



Fuente: MECANIZADOS. Propiedades, tipos y aplicaciones. [citado: 27 de enero del 2015]. Disponible en: <https://www.mecanizadossinc.com/mecanizado-latón-propiedades-tipos-aplicaciones/>.

1.3.3 Latón (Aleación Cu y Zn). El latón es una aleación de cobre y zinc, el color varia respecto a la cantidad de zinc presente en la aleación, Zn < 20% son colores en la gama de los rojos, y Zn > 20%, en la gama de los amarillos, presenta buenas propiedades mecánicas como los son la ductilidad y la maleabilidad, su temperatura de fusión es inferior a la del cobre (900-950) °C dependiendo su composición química, los latones bajos en zinc son dúctiles, resistentes a la corrosión, ideales para ser sometidos a altas temperaturas, excelentes características para trabajar en frío, son económicos, por otra parte los latones con alto contenido en zinc tienen menor ductilidad y presentan problemas para trabajar en frío, estos se extruyen en caliente. Para este tipo de material de carga la universidad asigno los porcentajes de composición química con los cuales trabajara el horno, teniendo en cuenta que sean materiales comerciales, dicha composición asignada fue de (70%Cu – 30%Zn), de acuerdo con esta característica a nivel normativo internacionalmente el código de identificación corresponde a C26000. Como se observa en la imagen 9.

Imagen 9. Latón 70%Cu-30%Zn



Fuente: MECANIZADOS. Propiedades, tipos y aplicaciones. [citado: 27 de enero del 2015]. Disponible en: <https://www.mecanizadossinc.com/mecanizado-laton-propiedades-tipos-aplicaciones/>.

Las propiedades térmicas, eléctricas y también características importantes que se tendrán en cuenta para los materiales definidos, son:

- Punto de fusión: es la temperatura a la cual el metal puro, compuesto o eutéctico cambia de sólido a líquido; La temperatura a la cual el líquido y el sólido están en equilibrio³.

³ BAUCCIO, Michael. ASM Metal reference book. Tercera edición. United States of America: ASM International, 1993. p. 57.

- Densidad: es una propiedad que describe la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia⁴.
- Permeabilidad magnética: la permeabilidad magnética es la medida de la capacidad de un material para soportar la formación de un campo magnético dentro de sí mismo. En otras palabras, es el grado de magnetización que obtiene un material en respuesta a un campo magnético aplicado⁵.
- Calor específico: la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa ⁶.
- Resistividad eléctrica: es la oposición que presentan los materiales para que fluya la corriente a través de ellos⁷.
- Conductividad eléctrica: es el valor recíproco de la resistividad eléctrica y representa la capacidad de un material para conducir una corriente eléctrica⁸.
- Conductividad térmica: es la propiedad en donde es medida de la capacidad del material para conducir calor⁹.

⁴ GROOVER, Mikell P. Fundamento de manufactura moderna. Tercera edición. Ciudad de México. McGraw Hill/Interamericana editores, 2007. p. 68.

⁵ MD. NAZOR, Khan. Principles of engineering physics 2. Primera edición. New York. Cambridge university press, 2016. p. 121.

⁶ MD. NAZOR, Khan. Principles of engineering physics 2. Primera edición. New York. Cambridge university press, 2016. p. 121.

⁷ L., Paul Y ROSSITER, Khan. The electrical resistivity of metals and alloys. Primera edición. New York. Cambridge university press, 1991. p. 1.

⁸ NERUDA, Marek. Modelling of electrical resistivity for electrically conductive textile materials. Trabajo de grado. Czech Technical University in Prague. Faculty of Electrical Engineering. Praga, 2014. p. 5.

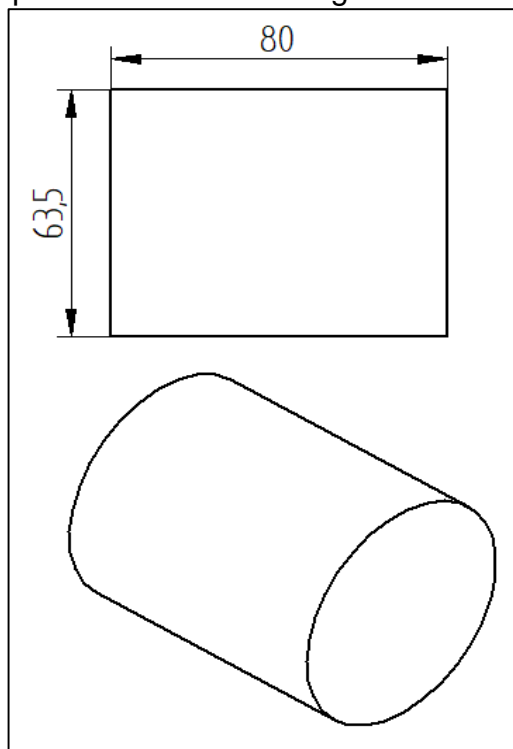
⁹ GROOVER, Mikell P. Fundamento de manufactura moderna. Tercera edición. Ciudad de México. McGraw Hill/Interamericana editores, 2007. p. 71.

- Emisividad térmica: describe la capacidad de un cuerpo sólido para irradiar calor, se sabe que la radiación de calor es un fenómeno oscilatorio electromagnético. Un cuerpo solido emite radiación en una gran longitud de onda.¹⁰

Dentro de la industria metalúrgica, la comercialización y distribución del cobre y sus aleaciones se encuentran en diferentes referencias, según el fabricante. Para el caso del cobre y latón, se pueden encontrar en platinas, laminas, alambres, barras y/o varillas. Para el caso de bronce las referencias varían de acuerdo con su composición química principalmente.

Las dimensiones necesarias para las probetas de los diferentes tipos de materiales de carga con las cuales operará el horno de inducción, se especifican en la imagen 10, donde se muestra que como máximo se puede utilizar un diámetro de 2 ½" pulgadas y una longitud máxima de 3" pulgadas, los cálculos respectivos se pueden encontrar en la página 46. Estas dimensiones están estandarizadas con el fin de tener fácil acceso en el mercado.

Imagen 10. Dimensiones requeridas para el material de carga en mm



Fuente: elaboración propia.

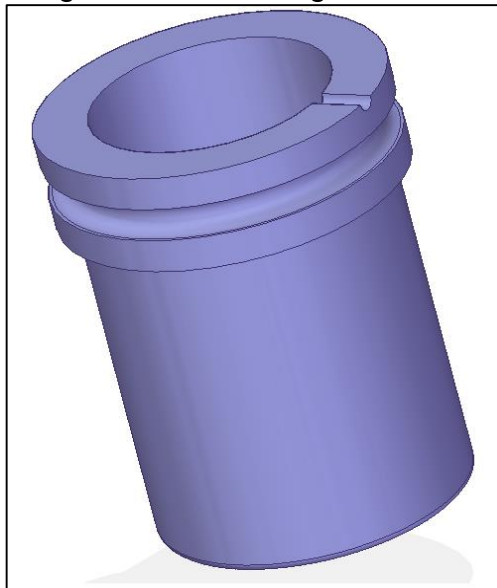
¹⁰ B. GINZBURG, Vladimir. Steel Rolling technology: theory and practice. Primera edición. Pennsylvania. Marcel Dekker Inc, 1999. p. 36.

1.4 TIPOS DE CRISOL

Los crisoles se definen como recipientes constituidos generalmente por cerámicos refractarios con forma cilíndrica y un orificio en la mitad que funciona como canal, similar a la forma de un vaso, para contener el material de carga ya sea en estado sólido o líquido, como se puede observar en la imagen 11. Los crisoles presentan diversas aplicaciones tanto a nivel industrial como a nivel de laboratorio. Para el caso de los hornos por inducción se caracterizan por cumplir con las siguientes funciones:

- Resistir altas temperaturas de operación.
- Contener el material.
- Resistir a reacciones químicas de la carga.

Imagen 11. Crisol de grafito arcilla



Fuente: elaboración propia.

Los crisoles se pueden clasificar por el material que lo constituye y la forma en que están diseñados.

1.4.1 Clasificación según el tipo de material. El material con el cual están elaborados los crisoles corresponde a los cerámicos refractarios, capaces de soportar altas temperaturas, por lo que este elemento se convierte en una parte importante en el calentamiento por inducción. Dentro de los materiales que normalmente constituyen los crisoles se encuentran:

- Nitruro de silicio (Si_3N_4): presenta baja expansión térmica, es buena a la resistencia al choque térmico incluyendo agrietamiento térmico, es un material

resistente a la corrosión de los metales no ferrosos fundidos. De acuerdo a estas características este cerámico incluye aplicaciones en turbinas de gas, motores para cohete y crisoles para fundir.

- Alúmina (Al_2O_3): este tipo de refractario se compone de bauxita (mezcla impura de óxido de aluminio), el cual cuenta con propiedades que presenta buena dureza en caliente, baja conductividad térmica y alta resistencia a la corrosión. Esta se utiliza como abrasivo en esmeriles y como ladrillos refractarios para hornos.
- Grafito arcilla: es una mezcla de materiales que se deriva del carbono cristalino en forma de capas con enlaces covalentes fuertes, con un cierto porcentaje de arcilla, por esta razón es resistente al choque térmico que le ayuda a tener propiedades refractarias importantes en la industria de la ingeniería y entre mayor temperatura más resistente, sin embargo, su resistencia se puede mejorar reduciendo el tamaño del grano. Debido a sus características especiales se convierte en un material con mucha versatilidad.

1.4.2 Clasificación de acuerdo con su forma. La forma de los crisoles puede variar según el fabricante o según la necesidad para la cual se deseen emplear. A continuación, se darán a conocer las formas más comunes de crisoles tal y como se evidencian desde la imagen 12 hasta la 15:

- Tipo A/AX/AX0

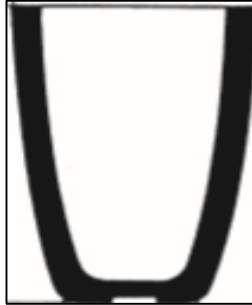
Imagen 12. Crisol Tipo A



Fuente: MARS INTERNATIONAL.
Tiegel - crucibles - creusets - crisoles - grafit + sic-produkte.
[citado: 6 de agosto de 2007]. Disponible en:http://www.gieterijservice.nl/pdf/ag/Aug_Gundlach_KG_catalogus.pdf.

- Tipo KF

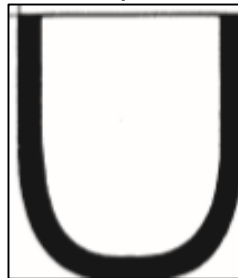
Imagen 13.
Crisol Tipo KF



Fuente: MARS INTERNATIONAL.
Tiegel - crucibles – creusets - crisoles – grafit + sic-produkte. [citado: 6 de agosto de 2007]. Disponible en: http://www.gieterijservice.nl/pdf/ag/Aug_Gundlach_KG_catalogus.pdf.

- Tipo B

Imagen 14.
Crisol Tipo B



Fuente: MARS INTERNATIONAL.
Tiegel - crucibles – creusets - crisoles – grafit + sic-produkte. [citado: 6 de agosto de 2007]. Disponible en: http://www.gieterijservice.nl/pdf/ag/Aug_Gundlach_KG_catalogus.pdf.

- Tipo BU

Imagen 15. Crisol
Tipo BU



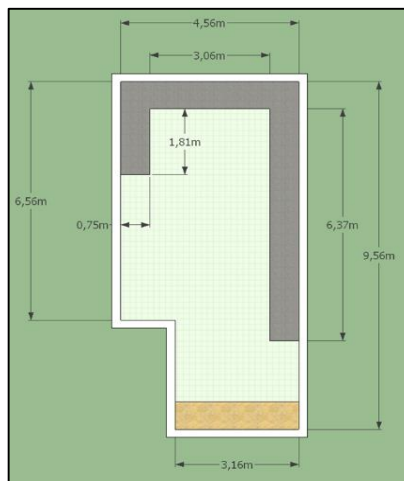
Fuente: MARS INTERNATIONAL. Tiegel - crucibles - creusets - crisoles - grafit + sic-produnkte. [citado: 6 de agosto de 2007]. Disponible en:http://www.gieterijservice.nl/pdf/ag/Aug_Gundlach_KG_catalogus.pdf.

2. PARÁMETROS Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

2.1 UBICACIÓN

Es necesario conocer el espacio que dispone la universidad para el montaje del horno por inducción, ya que de esto depende el diseño y la futura operación por el encargado del laboratorio y posterior manejo por parte de los estudiantes, en la imagen 16, se puede apreciar las dimensiones de los mesones donde tendrá que ir ubicado el horno.

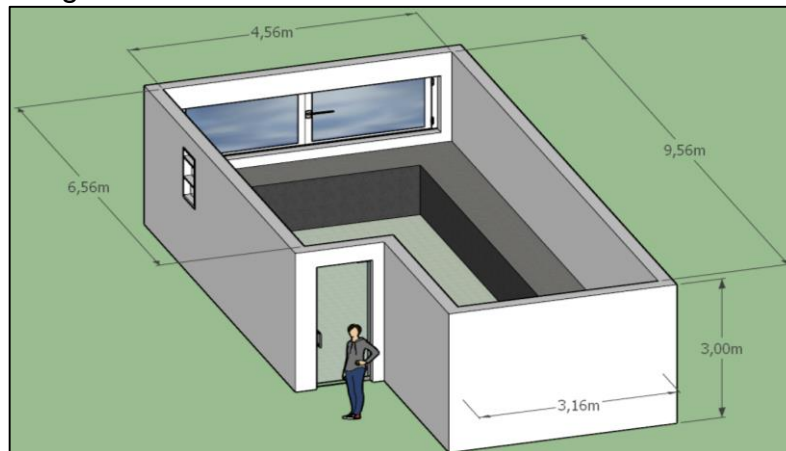
Imagen 16. Dimensiones del laboratorio



Fuente: elaboración propia.

Las dimensiones con las que cuenta el laboratorio se pueden apreciar en la imagen 17.

Imagen 17. Dimensiones del laboratorio



Fuente: elaboración propia.

2.2 REQUERIMIENTOS FUNCIONALES

Durante el desarrollo del horno por inducción, se estipularon ciertos requerimientos funcionales indispensables para el diseño y buen funcionamiento del horno como lo son:

- Materiales de carga.
- Capacidad del material de carga.
- Temperatura de operación.
- Tiempo de calentamiento.
- Fuente de energía.

2.2.1 Materiales de carga. Una vez establecidos los materiales de carga por la universidad es necesario conocer las propiedades físicas de cada uno de ellos, a continuación, se presentarán una serie de tablas donde se especifican dichas propiedades.

En la tabla 1, se observa las principales características físicas del cobre en estado puro el cual se manejará en las prácticas de laboratorio.

Tabla 1. Propiedades del cobre Cu

Cobre		
Descripción	Valor	Unidad
Temperatura inicial (T_i)	23	°C
Punto de fusión (T_{fusión})	1083,4	°C
Temperatura final (T_f)	1200	°C
Densidad (γ)	8960	kg/m ³
Permeabilidad magnética (μ)	1,255E-06	H/m
	1,255E-03	H/mm
Calor latente de fusión (Cl_f)	214	KJ/Kg
Calor específico (C)	387	J/Kg * °C
Resistividad eléctrica (ρ)	1,67E-08	Ω*m
Conductividad eléctrica (σ)	5,99E+07	1/Ω*m
Masa (m)	2	Kg
Volumen (V)	0,000223214	m ³
	223,2142857	cm ³
Delta de temperatura (θ_m)	1177	°C

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2, se observa las principales características físicas del bronce en composición 90% cobre – 10% estaño, el cual se manejará en las prácticas de laboratorio.

Tabla 2. Propiedades del bronce

Bronce (90%Cu - 10%Sn)		
Descripción	Valor	Unidad
Temperatura inicial (Ti)	23	°C
Punto de fusión (Tfusión)	999	°C
Temperatura final (Tf)	1200	°C
Densidad (γ)	8780	kg/m ³
Permeabilidad magnética (μ)	1,269E-06	H/m
	1,257E-03	H/mm
Calor latente de fusión (Clf)	230	KJ/Kg
Calor específico (C)	376,4	J/Kg * °C
Resistividad eléctrica (ρ)	1,57,E-07	Ω*m
Conductividad eléctrica (σ)		1/Ω*m
Masa (m)	2	Kg
Volumen (V)	0,00022779	m ³
	227,7904328	m ³
Delta de temperatura (θm)	1177	°C

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 3, se observa las principales características físicas del latón en composición 70% cobre – 30% zinc, el cual se manejará en las prácticas de laboratorio.

Tabla 3. Propiedades del latón

Latón (70%Cu - 30%Zn)		
Descripción	Valor	Unidad
Temperatura inicial (Ti)	23	°C
Punto de fusión (Tfusión)	955	°C
Temperatura final (Tf)	1200	°C
Densidad (γ)	8530	kg/m ³
Permeabilidad magnética (μ)	1,257E-06	H/m
	1,257E-03	H/mm
Calor latente de fusión (Clf)	168	KJ/Kg
Calor específico (C)	377	J/Kg * °C
Resistividad eléctrica (ρ)	6,2,E-08	Ω*m
Conductividad eléctrica (σ)	16129032,3	1/Ω*m
Masa (m)	2	Kg
Volumen (V)	0,00023447	m ³
	234,466589	m ³
Delta de temperatura (θm)	1177	°C

Fuente: elaboración propia.

2.2.2 Capacidad del material de carga. La capacidad del material de carga establecido por la universidad es de 2 kg, es necesario este dato para poder determinar la capacidad volumétrica del crisol dependiendo del volumen del material y también para determinar los parámetros de diseño electromagnético.

2.2.3 Temperatura de operación. La temperatura se estableció a partir de la propiedad de fusión de cada uno de los materiales de carga, como se mencionó anteriormente las temperaturas de fusión son de:

- Latón 955°C.
- Bronce 999°C.
- Cobre 1083,4°C.

A partir de las temperaturas de fusión, se determinó la temperatura de diseño del horno a 1200°C, abarcando incertidumbres, teniendo en cuenta que el cobre es el material que necesita una mayor temperatura para llegar a su punto de fusión. De esta manera se asegura cumplir con cada una de las temperaturas requeridas para cada uno de los materiales involucrados.

2.2.4 Tiempo de calentamiento. El tiempo estipulado por la universidad es de 40 minutos, teniendo en cuenta que la franja de horarios disponible para el uso de los laboratorios es de 2 horas, donde posterior al calentamiento del material de carga se realizaran distintos trabajos.

2.2.5 Fuente de energía. La fuente de energía con la que cuenta la universidad para este equipo es de 127 voltios de corriente alterna monofásica a 60 Hz de frecuencia.

3. PLANTEAMIENTO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO

Para el diseño se plantearon dos alternativas de horno por inducción las cuales son; un horno por inducción sin núcleo y un horno por inducción de canal, a partir de una matriz de scoring cualitativa se determinará qué equipo es más viable para el proceso y que cumpla con las especificaciones requeridas, a continuación, en la tabla 4, se compararan una serie de características principales que determinaran las diferencias entre los hornos por inducción.

Tabla 4. Scoring para hornos por inducción

Característica	Alternativa no.1 horno sin núcleo		Alternativa no.2 horno de canal	
	Descripción	Calificación	Descripción	Calificación
Rangos de frecuencias	200 Hz >	9	50 -200 KHz	3
Control de temperatura	Niveles precisos	7	Niveles precisos	2
Puntos de fusión de los materiales de carga	Altos	8	Bajos	4
Mezcla de fundición	Eficaz y homogénea	7	Malo	2
Vida útil del horno	Muy bueno	9	Malo	3
Duración de trabajo	Rápidos	9	Lentos	2
Transferencia de calor	Buena	6	Mala	2
Mantenimiento del equipo	Sencillo	7	Complejo	2
Total	62		20	

Fuente: elaboración propia.

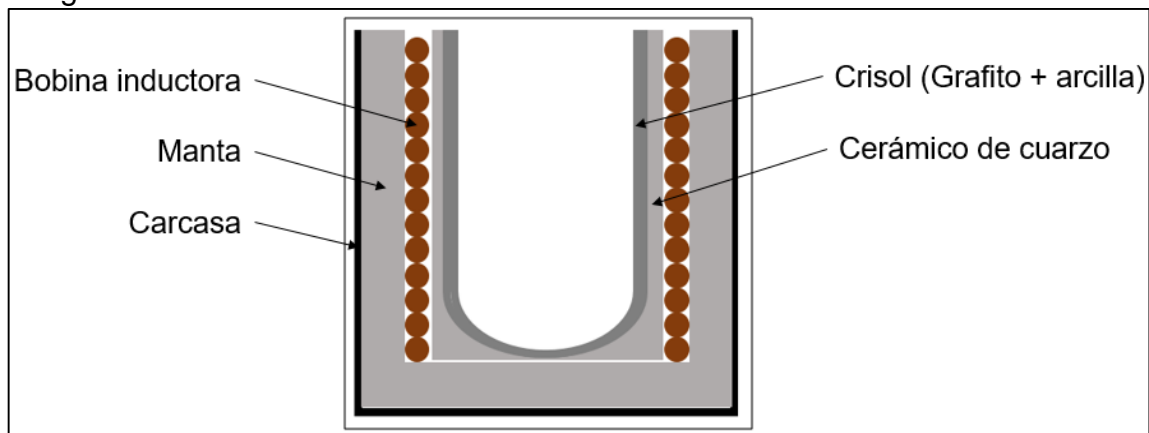
El rango de calificación está dado por una puntuación que se le asigna a cada característica dada. Las puntuaciones se encuentran de menor a mayor siendo la menor una característica "Muy mala" y la mayor "Excelente". De acuerdo a lo anterior la característica "Muy mala" es asignada una puntuación de 1, la característica "Malo" es asignada una puntuación de "2 y 3", la característica "Regular" es asignada una puntuación de "4 y 5", la característica "Bueno" es asignada una puntuación de "6 y 7", la característica "Muy Bueno" es asignada una puntuación de "8 y 9", por último, la característica de "Excelente" es asignada una puntuación de "10".

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la tabla 4, se determina que el equipo más satisfactorio para este proyecto es un horno por inducción sin núcleo, el cual es ideal para el trabajo de fundición, mezcla de aleaciones y refinación de los metales, su material de carga estará completamente inducido por la bobina generando una rapidez de calentamiento superior a los otros hornos, presenta una elevada eficiencia energética, las altas frecuencias de operación hacen que se genere a mayor rapidez el campo magnético, presentan costos de operación bajos y se caracterizan por ser amigables con el medio ambiente.

Teniendo en cuenta que anteriormente se seleccionó un horno sin núcleo, a continuación, se presentaran varias alternativas del diseño interno de las paredes del horno.

Como muestra en la Imagen 18, la alternativa 1 cuenta con un diseño, que incluye los siguientes componentes: desde el interior del horno se encuentra ubicado como primer componente, el crisol de material tipo “Grafito-arcilla”. Luego se encuentra una pared de material tipo “Cerámico de cuarzo”, el cual ayuda aislar la temperatura que emite el crisol, evitando daños en la bobina. Luego se encuentra ubicada la bobina la cual se encarga de emitir el campo electromagnético. Posteriormente se ubica una pared de material tipo “Manta, fibra de óxido de silicio-alúmina”, la cual ayuda aislar la temperatura a la zona exterior, para una mejor y segura operación. Por último, se encuentra ubicada la carcasa de material “Aluminio” del horno.

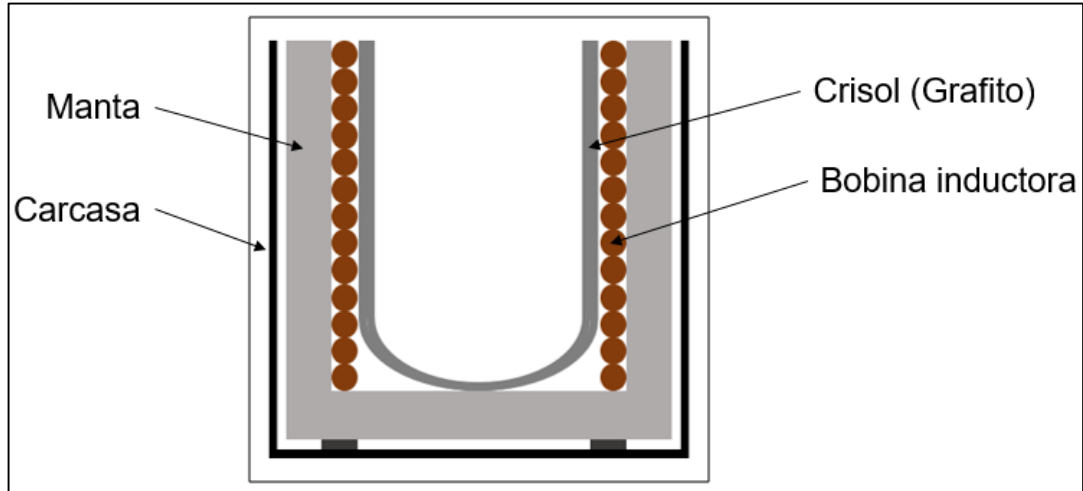
Imagen 18. Diseño de alternativa 1



Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la figura 19, la alternativa 2 se caracteriza por presentar un diseño, el cual, desde la parte interna del horno, primero cuenta con un crisol de material tipo “Grafito”. Seguido por la bobina de inducción. Luego se encuentra ubicado una pared de material tipo “Manta, fibra mineral de vidrio”, ayudando aislar la temperatura interna que emite el horno hacia la zona exterior. Seguida por una separación entre la pared de manta y la carcasa del horno. Por último, se encuentra ubicada la carcasa de material acero “AISI 1020” del horno.

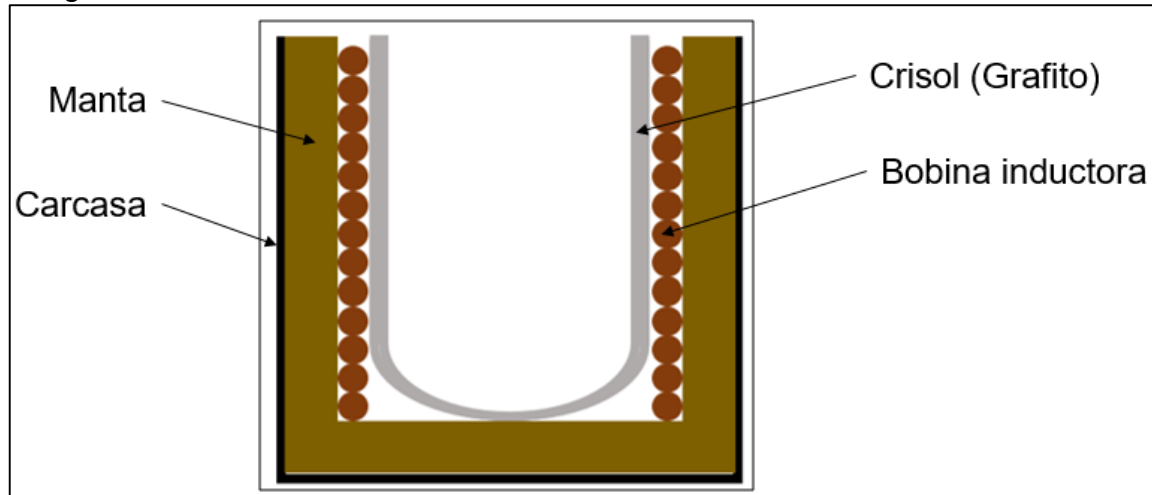
Imagen 19. Diseño de alternativa 2



Fuente: elaboración propia.

En la imagen 20, se presenta la alternativa 3, la cual presenta un diseño desde la parte interior del horno hacia la parte exterior del mismo, donde primero se ubica el crisol de material tipo "Grafito". Seguido por la bobina de inducción. Luego se ubica una pared de material tipo "Manta, fibra mineral de metal reforzado", el cual es el encargado de aislar la temperatura emitida desde la parte interna del horno hasta la zona exterior. Por último, se encuentra ubicada la carcasa de material acero "AISI 1020" del horno.

Imagen 20. Diseño de alternativa 2



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con las características de cada una de las alternativas presentadas y teniendo en cuenta la mejor configuración de materiales aislantes, se seleccionó la alternativa 1. Debido a que una característica del material aislante "Manta, fibra de

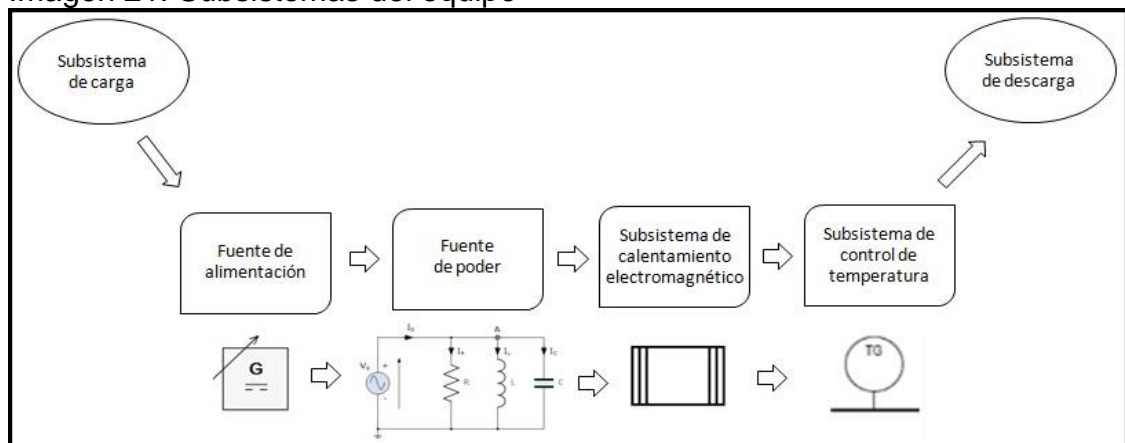
óxido de silicio-alúmina” es que soporta una temperatura máxima de servicio aproximada de 1300°C y el “Cerámico de cuarzo” con excelentes propiedades aislantes. Otra característica por la cual se seleccionó la alternativa 1, es la ubicación del material aislante tanto después del crisol, evitando afectaciones negativas en la bobina de inducción por las altas temperaturas, como después de la bobina, aislando la temperatura emitida en el interior del horno hacia el exterior.

4. DISEÑO CONCEPTUAL

Para el desarrollo del diseño se tendrán en cuenta las condiciones y requerimientos determinados anteriormente.

Los subsistemas que conforman el horno se pueden apreciar en la imagen 21, donde, se divide uno a uno desde el subsistema de carga hasta el subsistema de descarga conformando de esta manera el funcionamiento total de horno por inducción.

Imagen 21. Subsistemas del equipo



Fuente: elaboración propia.

4.1 SUBSISTEMA DE CARGA

Teniendo en cuenta que el horno por inducción está destinado para un laboratorio universitario se opta por realizar la alimentación del material de carga de forma manual buscando que los estudiantes tengan una interactividad directa con el equipo, cumpliendo con todas las normas de seguridad y operación necesarias durante la práctica de laboratorio.

4.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

El suministro eléctrico con el que cuenta actualmente la universidad es de 127 Voltios de corriente alterna monofásica a 60 Hz.

4.3 FUENTE DE PODER

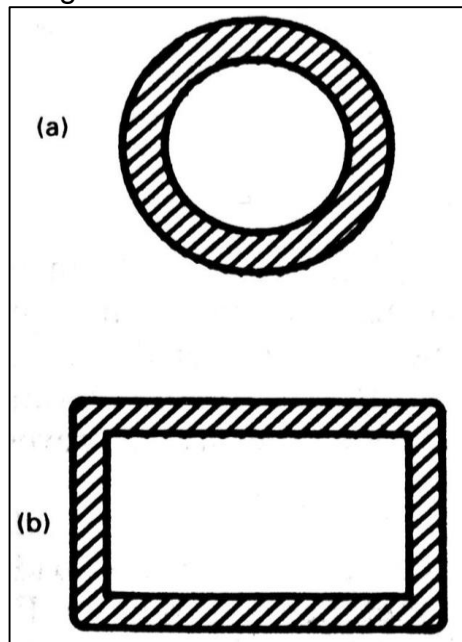
La fuente de poder es el elemento eléctrico y electrónico encargado de suministrar la corriente necesaria a la frecuencia requerida en la bobina de inducción para generar el calentamiento, entre sus componentes más importantes se encuentra el

rectificador que permite convertir la corriente alterna senoidal a corriente directa lo cual se requiere como paso intermedio para llegar a convertir una señal a una frecuencia superior de 60 Hz. El oscilador de frecuencia que requiere de una alimentación de corriente directa, con el fin de transformarla a corriente alterna senoidal incluyendo una alta variación de frecuencia, para lograr la aceleración de los electrones y así obtener el máximo nivel de calentamiento requerido.

4.4 SUBSISTEMA DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO

El encargado del calentamiento de la pieza en el horno será la bobina inductora que a través de la generación de un campo electromagnético de acuerdo con la ley de Faraday-Ampere hará que la corriente que circula por la bobina, por inducción origine las corrientes de Foucault a alta frecuencia en el material a fundir, la bobina inductora se construye con un perfil de cobre hueco para la refrigeración por agua, como se puede observar en la imagen 22, existen dos perfiles de bobinas tipo (a) y (b), la circular concentra el campo magnético de manera homogénea en el núcleo mientras que las de perfil rectangular no tiene la misma concentración de campo magnético debido a sus esquinas.

Imagen 22. Perfiles de bobinas



Fuente: ASTIGARRAGA URQUIZA, Julio y AGUIRRE ORMAZA, José Luis. Hornos industriales de inducción. Primera edición. México: Mc Graw Hill, 1999. 79 p.

4.5 SUBSISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

El sistema de control de temperatura permitirá censar y controlar la temperatura a la que es sometida la pieza con el fin de asegurar que es la requerida según cada material y una vez alcanzada, será enviada una señal al controlador para cortar el suministro de corriente a la bobina.

El elemento encargado de entregar la señal a la entrada del controlador es un sensor que se denomina termocupla, el cual está diseñado para censar diferentes rangos de temperaturas, así mismo son clasificadas conforme a sus capacidades térmicas, como se puede apreciar en la imagen 23.

Imagen 23. Tipos de termocuplas

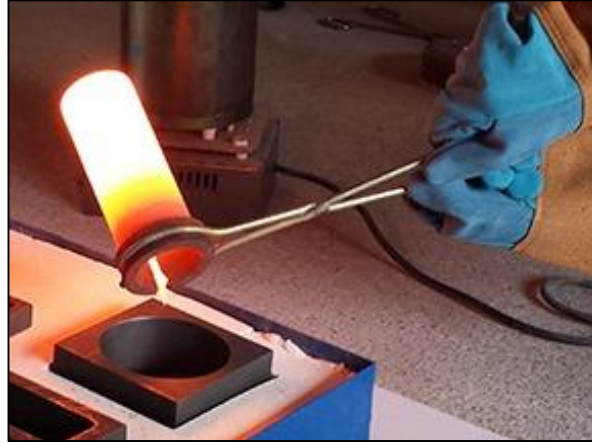
Tc	Cable + Aleación	Cable - Aleación	°C	Rango (Min, Max) mV	Volts Max
J	Hierro	cobre/nickel	(-180, 750)	42.2	
K	Nickel/cromo	Nickel/alumnio	(-180, 1372)	54.8	
T	Cobre	cobre/nickel	(-250, 400)	20.8	
R	87% Platino 13% Rhodio	100% Platino	(0, 1767)	21.09	
S	90% Platino 10% Rhodio	100% Platino	(0, 1767)	18.68	
B	70% Platino 30% Rhodio	94% Platino 6% Rhodio	(0, 1820)	13.814	

Fuente: ARIAN. Que son y cómo funcionan las termocuplas. [citado: 10 de septiembre de 2006]. Disponible en: <http://www.arian.cl/downloads/nt-002.pdf>.

4.6 SUBSISTEMA DE DESCARGA

Una vez fundido el material el operario del horno deberá extraer el crisol de forma manual a través de unas pinzas especiales que cazan en la ranura superior del crisol, teniendo en cuenta todos los elementos de seguridad que se requieren ya que el crisol saldrá con una temperatura elevada, posteriormente se verterá el material fundido donde se requiera, como se muestra en la imagen 16.

Imagen 24. Representación de sistema de descarga



Fuente: CHINA JIUCHEN. Graphite Crucible and Graphite Mold. [citado: 12 de septiembre de 2017]. Disponible en: <http://www.china-jiuchen.com/main.asp?pid=17&id=9>.

5. DISEÑO DETALLADO

5.1 CRISOL

Se selecciona el crisol teniendo en cuenta que será el punto de partida para los cálculos que se requieren en el diseño del horno, ya que otorgara el número de espiras, la longitud de calentamiento, las dimensiones del material de carga, dimensiones del cerámico, manta y finalmente la carcasa del horno.

El material del crisol es de grafito-arcilla teniendo en cuenta que es uno de los más usados en aplicaciones de ingeniería, debido a que su principal componente es el carbono, que en estado sólido presenta buenas propiedades refractarias. La forma en la que se encuentran unidos los átomos es covalente, por esto presenta capas paralelas gracias a las fuerzas débiles de Van der Waals, identificando al grafito como aniso trópico.

Las características que presenta el grafito-arcilla son:

- Es un material resistente al choque térmico incrementándose su resistencia a medida que se aumenta la temperatura.
- Su resistencia se puede mejorar reduciendo el tamaño del grano, hasta que los granos sean muy finos.
- Presenta conductividad eléctrica relativamente baja.
- Presenta propiedades antiadherentes.
- Puede soportar temperaturas por encima de los 1500°C.

Para el horno por inducción que se está diseñando es necesario tener en cuenta que el crisol debe llevar una pequeña ranura para poder retirarlo con unas pinzas de manera fácil, ágil y sobre todo segura para las personas que manipularan el horno. Por esta razón se encontró un fabricante que ofrece estas características para una capacidad de 2kg, como se muestra en la imagen 17.

Imagen 25. Crisol de ranura superior



Fuente: CHINA JIUCHEN. Graphite Crucible and Graphite Mold. [citado: 12 de septiembre de 2017]. Disponible en: <http://www.china-jiuchen.com/main.asp?pid=17&id=9>.

Para asegurar que las dimensiones de la probeta de los distintos materiales de carga ocupen el espacio disponible dentro del crisol, se realizaran los cálculos pertinentes para estandarizar las dimensiones con la siguiente ecuación de densidad¹¹:

$$\gamma = \frac{m_{carga}}{\pi * r_{carga}^2 * l_{carga}} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

Donde;

γ = Densidad del material de carga.

m_{carga} = Masa del material de carga.

r_{carga} = Diámetro de la pieza de carga.

l_{carga} = Longitud de la pieza de carga.

Se establece que la longitud de la pieza de carga será de 80 mm, para que no sobrepase la longitud que hay entre el fondo del crisol y la parte inferior de la ranura la cual es de 90 mm, como se observa en la imagen 26. Una vez especificadas estas dimensiones, se establece que la longitud de calentamiento es de 85 mm para asegurar un calentamiento homogéneo del material. Dicho lo anterior se procede a calcular el diámetro requerido para cada una de las probetas con un peso de 2kg.

$$8960 \frac{kg}{m^3} = \frac{2 kg}{\pi * r_{cobre}^2 * 0,080 m}$$

$$r_{cobre} = 0,02980 = 29,80mm \quad D = 59,6 mm$$

$$8780 \frac{kg}{m^3} = \frac{2 kg}{\pi * r_{bronce}^2 * 0,080 m}$$

$$r_{bronce} = 0,03010 = 30,10mm \quad D = 60,2 mm$$

$$8530 \frac{kg}{m^3} = \frac{2 kg}{\pi * r_{latón}^2 * 0,080 m}$$

$$r_{latón} = 0,03054 = 30,54mm \quad D = 62 mm$$

Según los cálculos realizados el latón es el que mayor diámetro tiene, el cual es de 62mm, con el fin de estandarizar las dimensiones se maneja un diámetro máximo de 2 ½" pulgadas y una longitud máxima de 3" pulgadas, como se puede observar en la imagen 10.

¹¹ CENGEL, Yunus A. Termodinámica. Séptima edición. Ciudad de México. McGraw Hill/Interamericana editores, 2012. p. 13.

Una vez estandarizada la medida de la probeta que mayor espacio ocupara en el crisol, se procede a seleccionar, en el catálogo del fabricante que recopila y especifica las dimensiones, capacidades y peso del crisol, el que mejor se adapta a los requerimientos.

Tabla 5. Dimensiones de crisoles de acuerdo a su capacidad

MODEL	SIZE (mm)				WEIGHT (GR)	APPLICABLE FURNACE
	A	B	C	H		
1 KG GRAPHITE CRUCIBLE	58	47	35	88	160	JC-K/A SERIES
2 KG GRAPHITE CRUCIBLE	65	58	44	110	240	JC-K/A SERIES
3 KG GRAPHITE CRUCIBLE	85	75	60	105	390	JC-K/A SERIES
4 KG GRAPHITE CRUCIBLE (WITH NECK)	90	76	60	130	510	JC-K/A SERIES
5 KG GRAPHITE CRUCIBLE	100	89	69	130	700	JC-S SERIES

Fuente: CHINA JIUCHEN. Graphite Crucible and Graphite Mold. [citado: 12 de septiembre de 2017]. Disponible en: <http://www.china-jiuchen.com/main.asp?pid=17&id=9>.

Como se puede observar en la tabla 5, las dimensiones para un crisol de 2 kg son las siguiente.

- A (Diámetro externo superior) = 65 mm.
- B (Diámetro exterior inferior) = 58 mm.
- C (Diámetro interior) = 44 mm.
- H (Altura total del crisol) = 110 mm.

Una vez establecidas las dimensiones del crisol se desea corroborar si es apropiado para la capacidad de 2kg.

Para esto se realizará el cálculo del volumen que dispone el crisol con la ecuación del volumen de un cilindro la cual es:

$$V_{crisol} = \pi * r_{ic}^2 * H_t \quad (m^3)$$

Donde;

V_{crisol} =Volumen de trabajo en el crisol.

r_{ic} =Radio interno del crisol.

H_t =Altura de trabajo del crisol.

$$V_{crisol} = \pi * (22 \text{ mm})^2 * 90 \text{ mm}$$

$$V_{crisol} = 136847.776 \text{ mm}^3 = 136.84 \text{ cm}^3$$

Una vez determinado el volumen disponible del crisol se desea saber el volumen ocupado por cada uno de los materiales de carga.

$$\gamma = \frac{m_{carga}}{V_{carga}} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

Donde;

V_{carga} = Volumen del material de carga.

De la anterior ecuación se despeja el valor del volumen para cada material.

$$V_{cobre} = \frac{2kg}{8960 \frac{kg}{m^3}}$$

$$V_{cobre} = 2.301 \times 10^{-4} m^3 = 223 \text{ cm}^3$$

$$V_{bronce} = \frac{2kg}{8780 \frac{kg}{m^3}}$$

$$V_{bronce} = 2.277 \times 10^{-4} m^3 = 227 \text{ cm}^3$$

$$V_{latón} = \frac{2kg}{8530 \frac{kg}{m^3}}$$

$$V_{latón} = 2.344 \times 10^{-4} m^3 = 234 \text{ cm}^3$$

Analizando los resultados para el volumen de cada material se obtiene que el latón con 234 cm³, ocupa mayor volumen, por ende, el crisol seleccionado no cumple con la capacidad necesaria. Por este motivo se selecciona el crisol de capacidad de 5 kg según fabricante, para comprobar si cumple con las expectativas del volumen.

Las dimensiones del crisol de capacidad de 5kg se obtienen a partir de la tabla 5, las cuales son:

- A (Diámetro externo superior) = 100 mm.
- B (Diámetro exterior inferior) = 89 mm.
- C (Diámetro interior) = 69 mm.

- H (Altura total del crisol) = 130 mm.

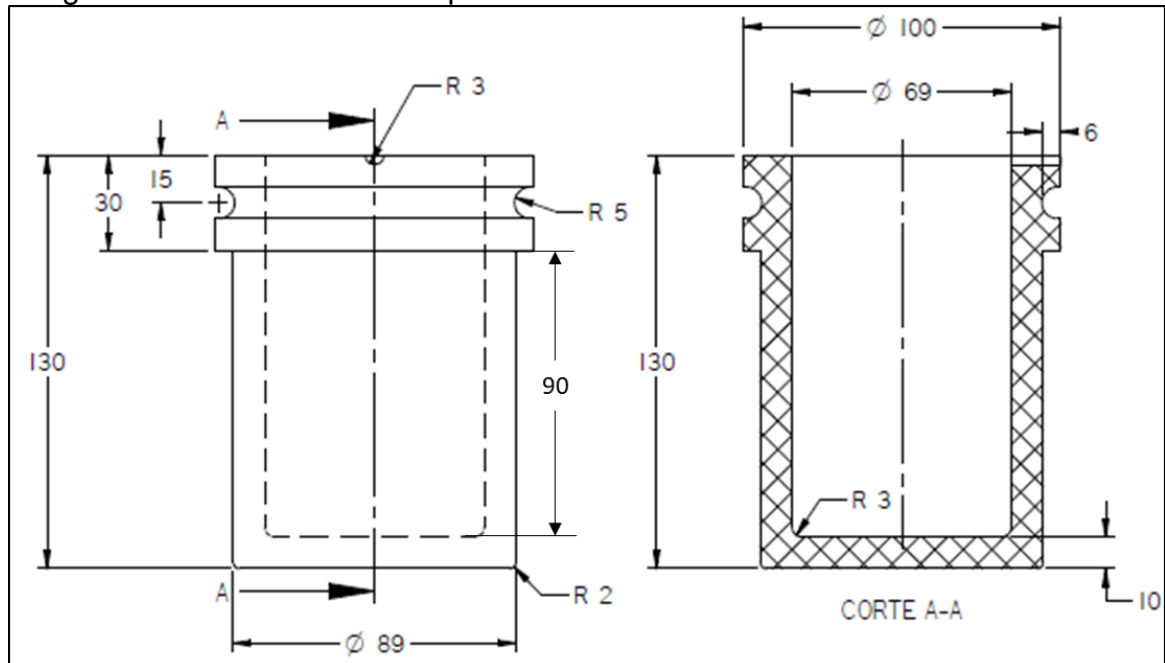
Establecidas las dimensiones se desea comprobar si el crisol seleccionado cumple con la capacidad volumétrica requerida para un volumen de 234 cm³.

$$V_{crisol} = \pi * (34,5mm)^2 * 85mm$$

$$V_{crisol} = 317838.8558 = 317.838cm^3$$

Como se puede observar la capacidad disponible del crisol de 5kg es de 318 cm³, la cual supera el volumen máximo requerido por los materiales de carga, que es de 234 cm³. Las dimensiones del crisol se pueden observar en la imagen 26.

Imagen 26. Crisol de ranura superior en mm

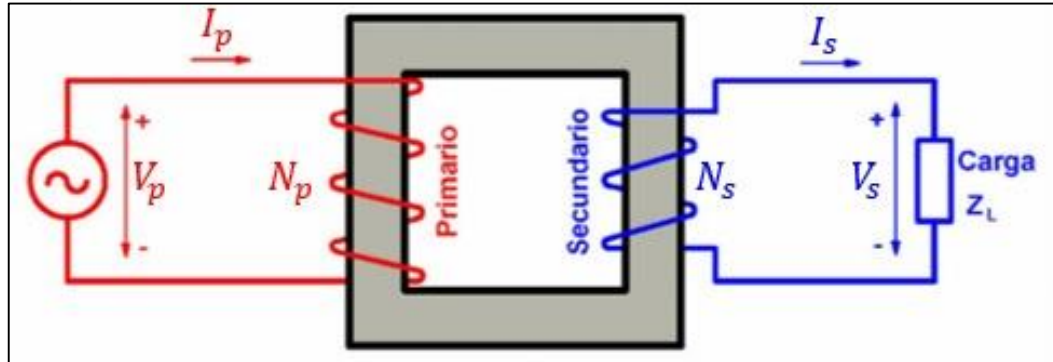


Fuente: elaboración propia.

5.2 BOBINA INDUCTORA

El sistema básico de calentamiento por inducción, se basa en el funcionamiento de un transformador ideal, bajo las leyes de Ampere.

Imagen 27. Funcionamiento de transformadores monofásicos



Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la imagen 27, por convención, se define que la parte del circuito en donde se ubica la fuente de alimentación se denomina el primario, el otro lado del circuito, el voltaje es inducido y se denomina el secundario. Para el caso del calentamiento por inducción el elemento primario hace referencia a la bobina de inducción y el secundario corresponde al material de carga (material a fundir).

Explicando la imagen 27, se tiene que:

V_p = Voltaje primario (Voltios).

I_p = Corriente primaria (Amperios).

N_p = No. De vueltas primarias (Bobina).

V_s = Voltaje secundario (Voltios).

I_s = Corriente secundaria (Amperios).

N_s = No. De vueltas secundaria (Material a fundir).

En un sistema la potencia expresada en vatios, corresponde a la siguiente ecuación¹²:

$$P = V * I * \cos \phi \quad (w)$$

Donde;

P = Potencia.

V = Voltaje.

I = Corriente.

¹² CHAPMAN, S. J. Maquinas eléctricas. Tercera edición. Bogotá D.C: Editorial McGraw-Hill, 1987. p. 67.

Para el transformador ideal, la eficiencia es del 100%, se asume que las pérdidas son despreciables, por lo cual la potencia de entrada es igual a la de salida, entonces:

$$V_p * I_p * \cos \phi = V_s * I_s * \cos \phi$$

Teniendo en cuenta que el transformador, es un elemento que transforma voltaje en forma proporcional a su relación de espiras, es decir:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

Se obtiene la siguiente formula:

$$V_p * I_p = V_s * I_s$$

Entonces:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad ; \quad \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

$$I_p * N_p = I_s * N_s$$

Teniendo en cuenta que el material de carga se asume como el secundario, el número de espiras es igual a 1.

$$I_p * N_p = I_s$$

El calentamiento por inducción se logra al inducir una corriente de alta frecuencia en el material de carga permitiendo la excitación de los electrones y la fricción ocasionada por la resistencia del material, que es proporcional a su resistividad. Por lo anterior la potencia disipada en el material de carga por efecto Joule, se expresa en la siguiente ecuación¹³:

$$P_d = I_s^2 * R_s \quad (w)$$

Donde;

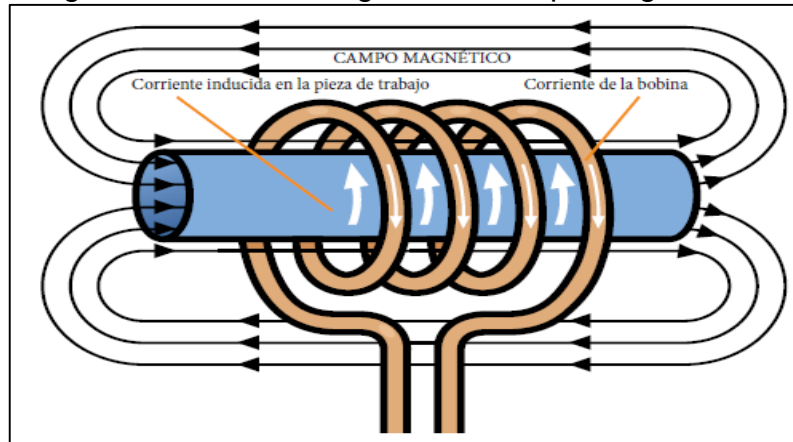
¹³ CHAPMAN, S. J. Maquinas eléctricas. Tercera edición. Bogotá D.C: Editorial McGraw-Hill, 1987. p. 70.

P_d = Potencia disipada en el material.

R_s = Resistencia del material.

La resistencia del material R_s es importante en el sistema de calentamiento por que se opone al flujo de la corriente que fluye a través de la bobina de inducción permitiendo la excitación y fricción de los electrones.

Imagen 28. Pieza de carga en un campo magnético



Fuente: AMBRELL. Acerca de inducción calentamiento. [citado: 15 de febrero de 2018]. P. 2. Disponible en: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/508263/Ambrell_PDFs/411-0169-16.pdf?t=1477689127410.

Como se muestra en la imagen 28, se evidencia el campo magnético generado por el paso de la corriente en la bobina y la resistencia del material que se opone a dicho flujo de corriente calentando de esta manera la pieza de carga, por lo anterior es importante hallar el valor de dicha resistencia del material mediante la siguiente ecuación¹⁴.

$$R_s = \frac{\rho * l_{carga}}{Area} = \frac{\pi * \rho * D_{carga}}{\delta * l_{carga}} \quad (\Omega)$$

Donde;

ρ = Resistividad eléctrica del material de carga.

δ = Profundidad de piel.

¹⁴ ASTIGARRAGA URQUIZA, Julio y AGUIRRE ORMAZA, José Luis. Hornos industriales de inducción. Primera edición. México D.F: Mc Graw Hill, 1999. p. 12.

La profundidad de piel es la distancia medida desde la superficie al interior de la pieza a la cual se realiza el cálculo de densidad de corriente¹⁵ y su ecuación es:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 * \rho}{\mu * \omega}} \quad (m)$$

Donde;

μ = Permeabilidad magnética.

ω = Frecuencia angular.

La permeabilidad magnética está definida por la siguiente ecuación¹⁶:

$$\mu = \mu_0 * \mu_r \quad \left(\frac{H}{m}\right)$$

Donde;

μ_0 = Permeabilidad magnética del espacio vacío.

μ_r = Permeabilidad magnética relativa del material.

La frecuencia angular se determina con la siguiente ecuación¹⁷:

$$\omega = 2 * \pi * f \quad (Hz)$$

Donde;

f = Frecuencia.

Teniendo en cuenta que el horno será para prácticas de laboratorio universitario con una capacidad de 2 kg, se puede clasificar en una frecuencia media como lo muestra la imagen 29.

¹⁵ GONZALEZ Winder, *et al.* Diseño y construcción de bobinas de calentamiento para hornos de inducción electromagnética. Primera edición. Caracas: Universidad Simón Bolívar, 2012. p. 30.

¹⁶ CHAPMAN, S. J. Maquinas eléctricas. Tercera edición. Bogotá: Editorial McGraw-Hill, 1987. p. 10.

¹⁷) BASTIAN, Peter. Electrotecnia. Vigésimo primera edición. España: Ediciones Akal, S.A. 2001. p. 22.

Imagen 29. Capacidades y potencias de los hornos de inducción

Frecuencia (Hz)	Capacidad (kg)	Potencia (kW)
Baja	6000 a 60000	1000 a 17000
Media	2 a 10000	3 a 3000
Alta	Nivel laboratorio o tamaño escala	

Fuente: C, Andrea y LANDÁZURI, F. Diseño y construcción de un horno de crisol para fusión de metales por inducción. [citado: 10 de julio del 2007]. P. 12. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/745/1/84537.pdf>.

La frecuencia operación en un horno por inducción se clasifica en:

- Baja frecuencia o frecuencia industrial: 50Hz – 200Hz.
- Media frecuencia: 200Hz – 10000Hz.
- Alta Frecuencia: Mayores a 10000Hz.

Reemplazado la ecuación de la resistencia del material y la corriente secundaria, en la potencia disipada en el material, se obtiene la siguiente expresión:

$$P_d = \frac{(I_p * N_p)^2 * \pi * \rho * D}{\delta * l} \quad (w)$$

Para conocer cuanta corriente debe inducir la bobina es necesario hallar el valor de la potencia superficial en la pieza, teniendo en cuenta el área del material de carga, la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$A_{carga} = \pi * D_{carga} * l_{carga} \quad (m^2)$$

Donde;

A_{carga} = Área transversal de la carga.

Teniendo en cuenta el área de la carga, la potencia que se genera en la superficie del material de carga, se describe en la siguiente ecuación¹⁸:

¹⁸ SHAMI, Umar. Design and development of an efficient coil for a resonant high frequency inverter for a induction heating. Lahore.: University of engineering and technology, 2008. p. 6.

$$P_{sur} = \frac{P_d}{\pi * D_{carga} * l_{carga}} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Donde:

P_{sur} = Potencia superficial del material de carga.

Por lo anterior la potencia disipada por el material, se sustituye en la ecuación de la potencia superficial generada en el material de carga.

$$P_{sur} = \frac{\frac{(N_p * I_p)^2 * \pi * \rho * D}{\delta * l}}{\pi * D_{carga} * l_{carga}} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Definida la anterior ecuación se realiza ley de extremos y medios dando como resultado:

$$P_{sur} = \frac{(N_p * I_p)^2 * \rho}{\delta * l_{carga}^2} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Se procede a reemplazar la potencia superficial del material de carga en la ecuación de profundidad de piel.

$$P_{sur} = \frac{(N_p * I_p)^2 * \rho}{\sqrt{\frac{2 * \rho}{\mu * \omega}} * l_{carga}^2} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

En la ecuación de la profundidad de piel se procede a reemplazar la frecuencia angular.

$$P_{sur} = \frac{(N_p * I_p)^2 * \rho}{\sqrt{\frac{2 * \rho}{\mu * 2 * \pi * f}} * l_{carga}^2} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Resolviendo:

$$P_{sur} = \left(\frac{N_p * I_p}{l_{carga}} \right)^2 * \frac{\rho}{\sqrt{\frac{\rho}{\mu * \pi * f}}} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$P_{sur} = \left(\frac{N_p * I_p}{l_{carga}} \right)^2 * \sqrt{\rho * \mu * \pi * f} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

La intensidad del campo magnético está dada por la siguiente ecuación¹⁹.

$$H = \frac{N_p I_p}{l_{carga}} \left(\frac{A * No. Vueltas}{m} \right)$$

Donde;

H = Intensidad del campo magnético.

Luego de resolver las anteriores ecuaciones se obtiene que la potencia generada en la superficie del material es igual a:

$$P_{sur} = (H)^2 * \sqrt{\rho * \mu * \pi * f} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Por otro lado, la potencia superficial en el material de carga también está dada por:

Energia en material = Energia almacenada por el material.

$$P_{sur} * t * A_{carga} = \theta_m * c * \gamma * V_{carga}$$

$$P_{sur} = \frac{\theta_m * c * \gamma * D_{carga}}{t * 4} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Donde;

θ_m = Delta de temperatura.

c = Calor específico.

t = Tiempo de calentamiento.

La intensidad del campo magnético se halla mediante la sustitución de ecuaciones de la potencia superficial en el material de carga anteriormente mencionadas.

$$H = \sqrt{\frac{P_{sur}}{\sqrt{\rho * \mu * \pi * f}}} \left(\frac{A * No. Vueltas}{m} \right)$$

¹⁹ CHAPMAN, S. J. Maquinas eléctricas. Tercera edición. Bogotá D.C: Editorial McGraw-Hill, 1987. p. 9.

Una vez determinadas las fórmulas para el diseño, es necesario establecer el número total de espiras, para este caso se decide trabajar con 9 espiras totales.

Para el desarrollo de los cálculos, es necesario iterar a distintas frecuencias para cada uno de los materiales estableciendo un rango de 3 kHz a 10 kHz para así de esta manera poder establecer la frecuencia de operación, mediante una hoja de cálculo donde se incluyen todas las formulas definidas anteriormente.

Como se puede observar en las tablas 6, 7 y 8, a mayor frecuencia menor será la intensidad del campo magnético, por este motivo se decide trabajar con una frecuencia de 10 kHz.

Tabla 6. Frecuencia requerida por el cobre

Voltaje (V)	Psuperficial 1 (Psur1)	Frecuencia (f)	Frecuencia angular(f) Hz	Intensidad de campo	Intencidad de campo magnetico (H) * 0,085	Corriente (Ip)	Profundidad de piel (δ)	# de espiras (Np)	Corriente (Is)
127 V	25339,338 W/m2	3000 Hz	18849,55592	42457,742 A/m	3608,908 A*Vuelta	400,99 A	0,001188051 m	9	3608,908 A
127 V	25339,338 W/m2	4000 Hz	25132,74123	39511,381 A/m	3358,467 A*Vuelta	373,16 A	0,001028882 m	9	3358,467 A
127 V	25339,338 W/m2	5000 Hz	31415,92654	37367,557 A/m	3176,242 A*Vuelta	352,92 A	0,000920260 m	9	3176,242 A
127 V	25339,338 W/m2	6000 Hz	37699,11184	35702,563 A/m	3034,718 A*Vuelta	337,19 A	0,000840079 m	9	3034,718 A
127 V	25339,338 W/m2	7000 Hz	43982,29715	34352,844 A/m	2919,992 A*Vuelta	324,44 A	0,000777762 m	9	2919,992 A
127 V	25339,338 W/m2	8000 Hz	50265,48246	33224,979 A/m	2824,123 A*Vuelta	313,79 A	0,000727530 m	9	2824,123 A
127 V	25339,338 W/m2	9000 Hz	56548,66776	32260,908 A/m	2742,177 A*Vuelta	304,69 A	0,000685921 m	9	2742,177 A
127 V	25339,338 W/m2	10000 Hz	62831,85307	31422,245 A/m	2670,891 A*Vuelta	296,77 A	0,000650722 m	9	2670,891 A

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Frecuencia requerida por el bronce

Voltaje (V)	Psuperficial 1 (Psur1)	Frecuencia (f)	Frecuencia angular(f) Hz	Intensidad de campo magnetico	Intencidad de campo magnetico (H) * 0,085	Corriente (Ip)	Profundidad de piel (δ)	# de espiras (Np)	Corriente (Is)
127 V	24396,480 W/m2	3000 Hz	18849,5559	23726,740 A/m	2016,773 A*Vuelta	224,09 A	0,003622836 m	9	2016,773 A
127 V	24396,480 W/m2	4000 Hz	25132,7412	22080,220 A/m	1876,819 A*Vuelta	208,54 A	0,003137468 m	9	1876,819 A
127 V	24396,480 W/m2	5000 Hz	31415,9265	20882,183 A/m	1774,986 A*Vuelta	197,22 A	0,002806236 m	9	1774,986 A
127 V	24396,480 W/m2	6000 Hz	37699,1118	19951,731 A/m	1695,897 A*Vuelta	188,43 A	0,002561732 m	9	1695,897 A
127 V	24396,480 W/m2	7000 Hz	43982,2972	19197,465 A/m	1631,785 A*Vuelta	181,31 A	0,002371703 m	9	1631,785 A
127 V	24396,480 W/m2	8000 Hz	50265,4825	18567,178 A/m	1578,210 A*Vuelta	175,36 A	0,002218525 m	9	1578,210 A
127 V	24396,480 W/m2	9000 Hz	56548,6678	18028,424 A/m	1532,416 A*Vuelta	170,27 A	0,002091645 m	9	1532,416 A
127 V	24396,480 W/m2	10000 Hz	62831,8531	17559,753 A/m	1492,579 A*Vuelta	165,84 A	0,001984309 m	9	1492,579 A

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Frecuencia requerida por el latón

Voltaje (V)	Psuperficial 1 (Psur1)	Frecuencia (f)	Frecuencia angular(f) Hz	Intensidad de campo magnetico	Intencidad de campo magnetico (H) * 0,085	Corriente (Ip)	Profundidad de piel (δ)	# de espiras (Np)	Corriente (Is)
127 V	24084,973 W/m2	3000 Hz	18849,5559	29812,948 A/m	2534,101 A*Vuelta	281,57 A	0,002287997 m	9	2534,101 A
127 V	24084,973 W/m2	4000 Hz	25132,7412	27744,074 A/m	2358,246 A*Vuelta	262,03 A	0,001981463 m	9	2358,246 A
127 V	24084,973 W/m2	5000 Hz	31415,9265	26238,725 A/m	2230,292 A*Vuelta	247,81 A	0,001772275 m	9	2230,292 A
127 V	24084,973 W/m2	6000 Hz	37699,1118	25069,601 A/m	2130,916 A*Vuelta	236,77 A	0,001617858 m	9	2130,916 A
127 V	24084,973 W/m2	7000 Hz	43982,2972	24121,856 A/m	2050,358 A*Vuelta	227,82 A	0,001497845 m	9	2050,358 A
127 V	24084,973 W/m2	8000 Hz	50265,4825	23329,893 A/m	1983,041 A*Vuelta	220,34 A	0,001401106 m	9	1983,041 A
127 V	24084,973 W/m2	9000 Hz	56548,6678	22652,942 A/m	1925,500 A*Vuelta	213,94 A	0,001320975 m	9	1925,500 A
127 V	24084,973 W/m2	10000 Hz	62831,8531	22064,050 A/m	1875,444 A*Vuelta	208,38 A	0,001253187 m	9	1875,444 A

Fuente: elaboración propia.

Una vez establecido que la frecuencia a manejar es de 10 kHz, se determina teniendo en cuenta las tablas 6, 7 y 8 que el campo magnético que debe manejar la bobina debe ser el del cobre, dado que es el campo magnético más alto como se puede observar en la tabla 6.

Definido lo anterior la bobina debe tener las siguientes características:

- Número total de espiras: 9.
- Intensidad de campo magnético: 31422,245 A/m.
- Frecuencia: 10 kHz.

Con las características definidas anteriormente se realiza el diseño de la bobina.

5.2.1 Cobre. Con las propiedades del material mencionadas en la tabla 1, se reemplaza los valores en las ecuaciones mencionadas anteriormente.

Según el procedimiento establecido, es importante conocer el valor de la profundidad de piel, para esto primero se halla el valor de la frecuencia angular.

$$\omega = 2 * \pi * 10000 \text{ Hz} = 62831,85 \text{ Hz}$$

$$\delta_c = \sqrt{\frac{2 * 1,67 \times 10^{-8} \Omega m}{1,255 \times 10^{-6} H/m * 62831,85 \text{ Hz}}}$$

$$\delta_c = 6,5 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Luego de realizar los cálculos, se procede a hallar las potencias superficiales.

$$P_{sur c} = \frac{1177 \text{ }^\circ\text{C} * 387 \frac{J}{Kg * ^\circ\text{C}} * 8960 \frac{kg}{m^3} * 0,05960 \text{ m}}{2400 \text{ seg} * 4}$$

$$P_{sur c} = 25339,338 \frac{W}{m^2}$$

$$P_{sur c} = (H)^2 * \sqrt{1,67 \times 10^{-8} \Omega m * 1,255 \times 10^{-6} H/m * \pi * 4000 \text{ Hz}}$$

Despejando de la anterior ecuación la intensidad del campo magnético.

$$H_c = \sqrt{\frac{25339.338 \frac{w}{m^2}}{\sqrt{1.67 \times 10^{-8} \Omega m * 1.255 \times 10^{-6} H/m * \pi * 10000 Hz}}}$$

$$H_c = 31442,245 \frac{A * No. Vueltas}{m}$$

$$H_c = 2670,891 A * No. Vueltas$$

Con la intensidad de campo definida 2670,891 Amperios por vuelta, se halla la corriente primaria, teniendo en cuenta el número total de espiras seleccionadas anteriormente.

$$I_p = \frac{2670,891 A * No. Vueltas}{9}$$

$$I_p = 296,77 A * No. Vueltas$$

Para la selección del diámetro necesario para la bobina se debe tener en cuenta la corriente primaria, la cual es cercana a los 300 amperios, a partir de un catálogo de fabricantes de bobinas de cobre esmaltado estándar como se observa en la imagen 30.

Imagen 30. Catálogo de embobinados

Dia-mm	Dia-in	Esp-Par	Circ-mils	Ohms/Kft	Ft/Ohm	Ft/Lb	Ohms/Lb	Lb/Kft	*Amps	MaxAmps
11.684	11	0.2	311500	0.0400	25000	1.5613	0.0001	640.48	283.12	433.18
10.405	10	0.2	167800	0.0618	16180	1.9688	0.0001	507.93	223.73	335.60
9.2657	9	0.25	133072	0.0775	12851	2.4826	0.0002	402.80	177.43	266.14

Fuente: LCARDABA. Tabla de grosores AWG (American wire gauge). [citado: 14 agosto de 2018]. Disponible en: <http://www.lcardaba.com/articles/awg.txt>.

Teniendo en cuenta que la corriente que se maneja es de 296,77 Amperios, se decide trabajar con un diámetro exterior de bobina inductora tubular de 10,40 mm, por la cual transita entre 0 hasta 335,60 Amperios, de esta manera asegurando que soporta la corriente requerida por el sistema, la bobina inductora se seleccionó del fabricante Goodfellow, como se muestra en el anexo A.

Otra de las condiciones que debe tener la selección de la bobina es que el número total de espiras de la bobina de cobre no debe sobrepasar la longitud disponible la cual es de 90 mm, por lo tanto, utilizando la siguiente ecuación:

$$\# \text{ total de espiras} = \frac{\text{longitud disponible}}{\text{Diametro nominal del alambre}}$$

$$\# \text{ total de espiras} = \frac{90 \text{ mm}}{10,4 \text{ mm}}$$

$$\# \text{ total de espiras} = 9$$

De esta manera se asegura que el número total de espiras seleccionado anteriormente no sobrepasara la longitud total disponible.

5.2.2 Bronce. Con las propiedades del material mencionadas en la tabla 2, se reemplaza los valores en las formulas mencionadas anteriormente, y se realizaran los mismos paso a paso del cálculo del cobre.

$$\omega = 2 * \pi * 10000 \text{ Hz} = 62831,85 \text{ Hz}$$

$$\delta_b = \sqrt{\frac{2 * 1.57 \times 10^{-7} \Omega m}{1.269 \times 10^{-6} H/m * 62831,85 \text{ Hz}}}$$

$$\delta_b = 1,98 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Luego de haber realizado los cálculos, se procede hallar las potencias superficiales.

$$P_{sur b} = \frac{1177 \text{ }^\circ\text{C} * 376.4 \frac{J}{Kg} * \text{ }^\circ\text{C} * 8780 \text{ kg/m}^3 * 0,06021 \text{ m}}{2400 \text{ seg} * 4}$$

$$P_{sur b} = 24396,480 \frac{W}{m^2}$$

$$P_{sur b} = (H)^2 * \sqrt{1.57 \times 10^{-7} \Omega m * 1.269 \times 10^{-6} H/m * \pi * 4000 \text{ Hz}}$$

Por lo que se dice:

$$H_b = \sqrt{\frac{24396.480 \frac{W}{m^2}}{\sqrt{1.57 \times 10^{-7} \Omega m * 1.269 \times 10^{-6} H/m * \pi * 10000 \text{ Hz}}}}$$

$$H_b = 17559,753 \frac{\text{Amperios} * \text{No. Vueltas}}{m}$$

$$H_b = 1492,579 \text{ A} * \text{No. Vueltas}$$

Con la intensidad de campo definida 1492,579 Amperios por vuelta, se halla la corriente primaria, teniendo en cuenta el número total de espiras seleccionadas anteriormente.

$$I_p = \frac{1492,579 A * No. Vueltas}{9}$$

$$I_p = 165,84 A * No. Vueltas$$

5.2.3 Latón. Con las propiedades del material mencionadas en la tabla 3, se reemplaza los valores en las formulas mencionadas anteriormente, y se realizaran los mismos paso a paso del cálculo del cobre.

$$\omega = 2 * \pi * 10000 Hz = 62831,85 Hz$$

$$\delta_l = \sqrt{\frac{2 * 6.2 \times 10^{-8} \Omega m}{1.257 \times 10^{-6} H/m * 62831,85 Hz}}$$

$$\delta_l = 1,25 \times 10^{-3} m$$

Luego de haber realizado los cálculos, se procede hallar las potencias superficiales.

$$P_{sur l} = \frac{1177 \text{ } ^\circ C * 377 \frac{J}{Kg} * \text{ } ^\circ C * 8530 kg/m^3 * 0,06108m}{2400 seg * 4}$$

$$P_{sur l} = 24084.973 \frac{W}{m^2}$$

$$P_{sur l} = (H)^2 * \sqrt{6.2 \times 10^{-8} \Omega m * 1.257 \times 10^{-6} H/m * \pi * 4000 Hz}$$

Por lo que se dice:

$$H_l = \sqrt{\frac{24084.973 \frac{W}{m^2}}{\sqrt{6.2 \times 10^{-8} \Omega m * 1.257 \times 10^{-6} H/m * \pi * 10000 Hz}}}$$

$$H_l = 22064,050 \frac{Amperios * No. Vueltas}{m}$$

$$H_b = 1875,44 A * No. Vueltas$$

Con la intensidad de campo definida 1492 Amperios por vuelta, se halla la corriente primaria, teniendo en cuenta el número total de espiras seleccionadas anteriormente.

$$I_p = \frac{1875,44 A * No. Vueltas}{9}$$

$$I_p = 208,38 A * No. Vueltas$$

Con los cálculos realizados para determinar la corriente primaria se puede apreciar que el cobre es el material que más corriente requiere con un valor de 296,77 Amperios, valor de partida para la selección de los componentes del horno.

5.3 FUENTE DE PODER

Los requerimientos eléctricos para suplir la energía del sistema se pueden clasificar de la siguiente manera:

Suministro de energía a partir de la red del laboratorio.

Teniendo en cuenta que el valor de la potencia superficial es de 25339,33 w/m² y que el área que recorre la corriente es de $2 * \pi * r * l$ que es de 0.01457 m² la potencia total que disipa la superficie de la pieza es de 379,58 w, para calcular la potencia de la fuente de la red asumiremos que las pérdidas que se generan en el proceso son despreciables, porque se está implementando el modelo de un transformador ideal lo cual implica que la red debe suministrar por lo menos 379,58 w, por seguridad para suplir cualquier sobrecarga se ajusta por norma un 30% más de potencia, lo que implica que la red debe ser capaz de suplir 500w.

El suministro de energía eléctrica es de 127 V, 60 Hz lo cual implica que para una carga de 500 w se maneje una corriente de:

$$I = \frac{P}{V * \cos \phi} \quad (A)$$

Donde;

$\cos \phi = 0.92$ valor estándar típico.

Reemplazando los valores, se obtiene:

$$I = \frac{500w}{127V * 0.92}$$

$$I = 4.279 A$$

De acuerdo con los requerimientos del horno diseñado se seleccionó del catálogo del fabricante Top Cast una fuente de poder de 10kw como se puede observar en el anexo G, se debe tener en cuenta que es la potencia mínima que maneja el fabricante, siendo esta la más cercana a la requerida y que asegura una señal de salida de 10kHz.

Para asegurar las características principales de la fuente de poder, se contactó a la empresa IEPF S.A.S encargada de la distribución y diseño de hornos por inducción a nivel industrial, de esta manera logrando conseguir de manera exacta los datos y medidas específicas de la fuente de poder, esta fuente de poder como se puede observar en la imagen 31, posee una serie de elementos electrónicos dentro de los cuales, los más relevantes son:

- Inversor.
- Rectificador.
- Variador de frecuencia.
- Capacitores.

Estos están diseñados en paralelo para una mayor eficiencia, cuenta con una caja para el aislamiento de sus componentes, las medidas de esta son:

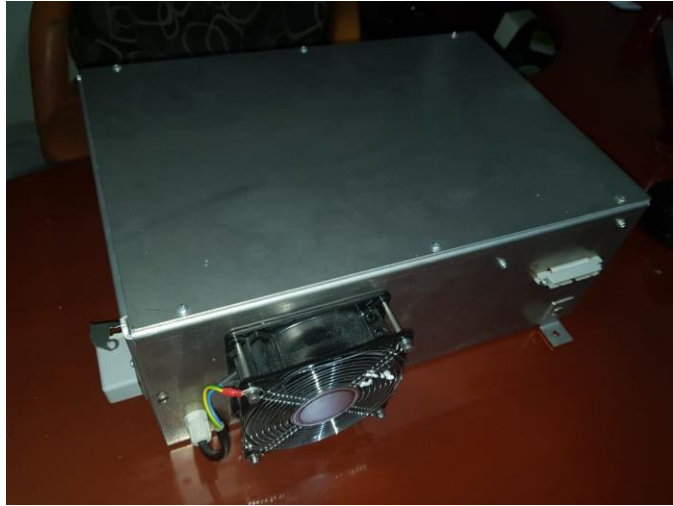
- Ancho= 400 mm.
- Largo= 350 mm.

Imagen 31. Fuente de poder suministrada por IEPF S.A.S



Fuente: elaboración propia.

Imagen 32. Fuente de poder suministrada por IEPF S.A.S



Fuente: elaboración propia.

5.3.1 Transformador reductor. Teniendo en cuenta cálculos anteriores donde la corriente que circula por la bobina inductora o corriente primaria es de 296,77 Amperios, es necesario un transformador reductor, que permita reducir el voltaje, para aumentar la corriente, de esta manera evitando nuevos requerimientos en el punto cero y disminuyendo costes de implementación del horno.

Para determinar el voltaje necesario en la bobina inductora se utiliza la siguiente ecuación.

$$P = V * I * \cos \phi \quad (w)$$

$$V = \frac{P}{I * \cos \phi} \quad (V)$$

$$V = \frac{500 w}{296,77 A * 0,92} \quad (V)$$

$$V = 2 V$$

Para la selección del transformador se debe tener en cuenta los voltios que se desean generar para lograr cumplir con la corriente necesaria.

Imagen 33. Transformador reductor

	SEM62 - Transformador 110V ca/2V ca	
	Precio de lista	> Mostrar precios
Precio de cliente		> Mostrar precios
Producto		
Número de artículo (número de mercado)	SEM62	BPZ:SEM62
Descripción de producto	SEM62 - Transformador 110V ca/2V ca	
Familia de producto	> BPZ:SEM62.. - Transformadores	
Ciclo de vida del producto (PLM)	PM300:Producto activo	
Datos de precio		
Grupo de precios / Grupo de precios de Casa Matriz y local	3L1 / 3L1	
Precio de lista	> Mostrar precios	
Precio de cliente	> Mostrar precios	
Factor del metal	Ninguno	

Fuente: SIEMENS. Catalogo de transformadores. [citado: 6 de noviembre de 2008] Disponible en:
<https://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentcenter/c/e/Documentsu20Brochures/e86060-k1090-a101-a1-7800.pdf>.

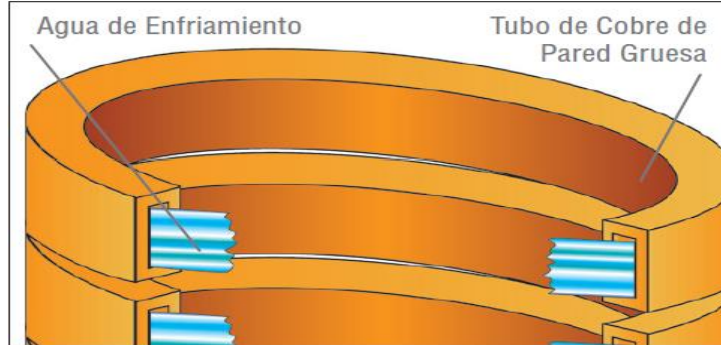
Como se observa en la imagen 33 se selecciona un transformador reductor de la compañía siemens, dado que esta compañía permite un fácil acceso a él y con muy buenas garantías de trabajo. El transformador tiene la capacidad de transforma de 110 voltios de corriente alterna hasta 2 voltios, lo necesario para para cumplir con el trabajo deseado.

5.4 SISTEMA DE REFRIGERACION

El sistema de refrigeración en un horno por inducción, es de vital importancia debido a que la bobina está sometida a altas temperaturas, pero sobre todo la gran cantidad de corriente eléctrica que viaja por ella. Como se mencionó anteriormente la bobina es responsable de generar el campo electromagnético, por lo que su cuidado es especial, por lo tanto, no se debe permitir el incremento de su temperatura, evitar el efecto de acritud en donde se puede ver afectadas las propiedades físicas de la bobina con el paso del tiempo. El sistema de refrigeración puede contrarrestar los problemas anteriores y evitar que la bobina se funda o tenga problemas de funcionamiento.

Este tipo de hornos presentan un sistema de refrigeración particular debido a que se debe suministrar un líquido refrigerante que por lo general es agua fría, al interior de la bobina. Dicho líquido debe tener unas propiedades especiales, para contrarrestar la corrosión y granulación antes de la aspersion. Como se muestra en la imagen 34.

Imagen 34. Esquema de refrigeración en la bobina



Fuente: INDUCTOTHERM. Guía de fundamentos de seguridad en la fundición por inducción que puede salvar su vida. [citado: 18 de enero de 2011]. Disponible en: <https://code.inductotherm.com/06%20Resources/Safety/M2573%20Rev%202.pdf>.

Los sistemas de refrigeración usados en los hornos por inducción se dividen en:

- Sistema de circuito abierto. Es uno de los sistemas de refrigeración más económicos y eficientes del mercado, se debe tener en cuenta que presenta más consumo de agua y se caracteriza por estar en contacto con un flujo de aire para lograr enfriar el agua, este flujo de aire puede darse por tiro mecánico o por tiro natural, dependiendo de la aplicación.
- Sistema de circuito cerrado con radiadores. Se caracteriza por el paso del fluido muy cerca de un ventilador radiador que es impulsado mecánicamente, su ventaja es que no requiere gran cantidad de tuberías ni cableado de control.
- Sistema de circuito cerrado con intercambiadores. Este tipo de sistema cuenta con equipos auxiliares como los intercambiadores de calor que separan las corrientes fluidas, los cuales, por lo general se sitúan en medio de la torre de enfriamiento y el sistema del horno por inducción.

Luego de conocer los sistemas de refrigeración se procederá con el cálculo correspondiente para hallar el calor a retirar. Teniendo en cuenta que la temperatura final de la bobina debe ser de 40°C, ya que, si este valor se excede, esta podría verse afectada, El calor a ser retirado está dado por:

$$Q_{tr} = Q_{sc} + Q_l + Q_{sb} \quad (J)$$

Donde;

Q_{tr} = Calor total a retirar.

Q_{sc} = Calor sensible del material de carga.

Q_{sb} = Calor sensible de la bobina.

El calor sensible del material está dado por la siguiente ecuación²⁰.

$$Q_{sc} = m_m * \Delta T * C \quad (J)$$

Donde;

ΔT = Delta de temperatura del material de carga.

En el caso del calor sensible de la bobina se tiene en cuenta la temperatura final e inicial de la bobina, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$Q_{sb} = m_b * \Delta TB * C \quad (J)$$

Donde;

m_b = Masa de la bobina.

ΔTB = Delta de temperatura de la bobina.

La masa de la bobina se expresa de la siguiente manera.

$$m_b = \gamma_b * h * (r_{eb}^2 - r_{ib}^2) \quad (kg)$$

Reemplazando la ecuación anterior en la ecuación del calor sensible de la bobina, la ecuación resultante es.

$$Q_{sb} = (\gamma_b * h * (r_{eb}^2 - r_{ib}^2)) * \Delta TB * C$$

Donde;

γ_b = Densidad de la bobina.

h = Longitud de la bobina estirada.

r_{eb} = Radio externo de la bobina.

r_{ib} = Radio interno de la bobina.

Luego de tener las ecuaciones anteriormente definidas se halla el calor a ser retirado. Para la selección apropiada del sistema más óptimo de refrigeración se debe tener en cuenta que el diámetro por donde va a fluir el agua, es el diámetro interno del tubo de la bobina, por lo que se define el perímetro mojado con la siguiente ecuación.

$$P_m = \pi * D_{ib} \quad (m)$$

²⁰ CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. Tercera edición. Ciudad de México D.F. McGraw Hill/Interamericana editores, 2007. p. 13.

Donde;

P_m = Perímetro mojado.

D_{ib} = Diámetro interno de la bobina.

Es necesario emplear las ecuaciones de canales tipo sección circular para hallar el caudal necesario en el sistema de refrigeración para un mayor rendimiento Iniciando con las ecuaciones del perímetro mojado hasta terminar hallando el valor del caudal presente en el sistema.²¹

$$P_m = \frac{\phi * D_{ib}}{2} \quad (m)$$

Donde;

ϕ = Ángulo de descarga.

Teniendo un valor de 90° de ángulo de caudal se procede a calcular el área de flujo, mediante la siguiente ecuación.

$$A_F = \frac{(\phi - \sin \phi) * D_{ib}^2}{8} \quad (m^2)$$

Donde;

A_F = Área de flujo.

Luego se procede hallar el valor del radio medio hidráulico, mediante la siguiente expresión.

$$R_{mh} = \frac{1}{4} * \left(1 - \frac{\sin \phi}{\phi}\right) * D_{ib} \quad (m)$$

Donde;

R_{mh} = Radio medio hidráulica.

Luego se halla la pendiente de fondo con la siguiente ecuación.

$$S = \sqrt{r_{ib}^2 + r_{ib}^2} \quad (m)$$

Donde;

S = Pendiente de fondo.

²¹ ROJAS, Hugo. "Diseño de canales". [En línea]. [04 julio de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/linoolascuagacruzado/diseo-de-canales>.

Conocido el valor se procede hallar el valor del caudal, expresado con la siguiente ecuación.

$$Q = \left(\frac{1}{8}\right) * A_F * R_{mh}^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \left(\frac{m^3}{h}\right)$$

Donde;

Q =Caudal.

Finalmente se procede hallar la velocidad del caudal, con la siguiente ecuación.

$$V = \frac{Q}{A_F} \left(\frac{m}{h}\right)$$

Con las formulas anteriormente definidas se procederá inicialmente a conocer la cantidad de calor a retirar para cada uno de los materiales de carga como se muestra en las tablas 10,11 y 12.

Tabla 9. Calor global generado con el cobre

Cobre		
Descripción	Valor	Unidad
Calor generado al pasar de 40 a 1200 °C	897840	J
Energia cambio de fase	428000	J
Calor generado al pasar de 20 a 40 °C	15480	J
Calor global	1341320	J
	320,584	Kcal
	400,729	Kcal

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10. Calor global generado con el bronce

Bronce		
Descripción	Valor	Unidad
Calor generado al pasar de 40 a 1200 °C	874640	J
Energia cambio de fase	460000	J
Calor generado al pasar de 20 a 40 °C	15480	J
Calor global	1350120	J
	322,687	Kcal
	403,358	Kcal

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Calor global generado con el latón

Latón		
Descripción	Valor	Unidad
Calor generado al pasar de 40 a 1200 °C	873248	J
Energía cambio de fase	336000	J
Calor generado al pasar de 20 a 40 °C	15480	J
Calor global	1224728	J
	292,717	Kcal
	365,897	Kcal

Fuente: elaboración propia.

En el valor total del calor global para cada material de carga se tuvo en cuenta un factor de corrección del 25%. Como se puede observar en las tablas 9, 10 y 11, la mayor cantidad de calor a retirar corresponde es al momento de trabajar con el bronce. Teniendo en cuenta estos datos se procede con el análisis necesario para el valor necesario del caudal.

Según el procedimiento establecido anteriormente se procede hallar el valor del perímetro interno de la bobina.

$$P_m = \pi * 0,010 \text{ m} = 0,03142 \text{ m}$$

A lo largo del recorrido del caudal se dejó un espacio al interior de la tubería con ángulo de 90 °, respecto a su nivel, como margen de seguridad para la prevención de un colapso debido a los cambios bruscos de presión.

$$A_F = \frac{(90^\circ - \sin 90^\circ) * (0,010 \text{ m})^2}{8}$$

$$A_F = 0,001113 \text{ m}^2$$

Luego se realiza el cálculo del radio medio hidráulico.

$$R_{mh} = \frac{1}{4} * \left(1 - \frac{\sin 90}{90}\right) * 0,010 \text{ m}$$

$$R_{mh} = 0,00247 \text{ m}$$

Luego de tener este dato se realiza el cálculo de la pendiente de fondo.

$$S = \sqrt{0,005\text{m}^2 + 0,005\text{m}^2}$$

$$S = 0,007071 \text{ m}$$

Con los datos anteriores se procede hallar el valor del caudal considerando que el coeficiente de rugosidad tiene un valor de 0,010 y una constante K igual a 1. Como se muestra a continuación.

$$Q = \left(\frac{1}{8}\right) * 0,001113 \text{ m}^2 * 0,010 \text{ m}^{\frac{2}{3}} * 0,007071 \text{ m}^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = 0,0001713 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q = 0,0001713 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}\right)$$

$$Q = 0,61697 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Finalmente, con el valor del caudal se procede a calcular el valor de la velocidad.

$$V = \frac{0,61697 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{0,001113 \text{ m}^2}$$

$$V = 553,9211 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

De acuerdo a los requerimientos de operación del horno y los valores anteriormente calculados, para seleccionar el sistema de refrigeración se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Temperatura máxima de operación. 1200°C.
- Temperatura a la que debe estar refrigerada la bobina. 40°C.
- Calor máximo a retirar. 403,35 Kcal.
- Caudal. 0,61697 m³/h.

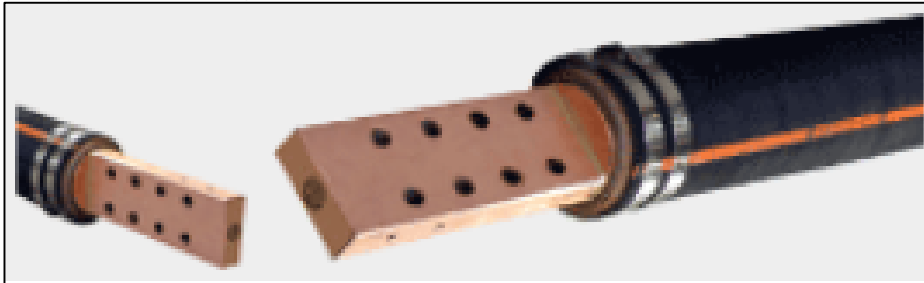
Con los parámetros anteriores se seleccionó el sistema de refrigeración tipo “chiller”, debido a que es el equipo más adecuado y completo para la refrigeración de la bobina por ser capaz de enfriar o calentar líquido mediante un intercambio de calor, según sea su aplicación y para este caso del horno por inducción que es necesario enfriar el sistema de inducción se adecua cumpliendo con los parámetros necesarios.

Gracias a los requerimientos hallados como lo son el caudal del sistema y las temperaturas de operación, las cuales, son suministrados a los fabricantes y/o distribuidores de sistemas de refrigeración para que con la experiencia y el servicio técnico que ellos cuentan, arrojen una capacidad de toneladas de refrigeración necesarias para el óptimo funcionamiento del equipo, como se observa en el anexo B.

5.5 BUSBAR

El concepto busbar hace referencia a una manguera libre de carbono, formando parte importante del horno, debido a que cumple con la función de conectar la fuente de poder a la bobina transportando la corriente requerida y a su vez otra conexión entre el sistema de refrigeración y la bobina para el paso del agua, todo esto sin ningún inconveniente, debido a que como se mencionó anteriormente está compuesto de materiales libres de carbono y se puede apreciar en la imagen 35.

Imagen 35. Manguera libre de carbono



Fuente: DRUSEIDT ELEKTROTECHNIK. Cables refrigerados con agua. [citado:6 de noviembre de 2018]. Disponible en: https://www1.druseidt.de/spanisch/produkte/flexible_verbindung/en/untermenue/e.html.

Las aplicaciones de esta manguera se extienden a lo largo de la industria de hornos de fundición, especialmente los hornos por inducción que manejan un rango de corrientes elevadas, se seleccionó del fabricante Airtech como se puede apreciar en el anexo C.

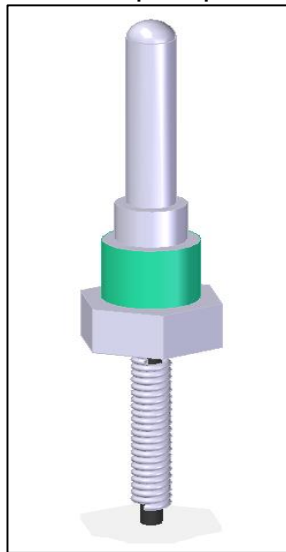
5.6 SELECCIÓN DEL CONTROL DE TEMPERATURA

El sistema de control de temperatura permitirá censar y controlar la temperatura a la que estará sometida la pieza, esto se logra mediante un controlador digital con una entrada y salida de señal, la señal de entrada está conectada a un termopar y la señal de salida a la bobina inductora.

El controlador de temperatura y el termopar se seleccionará de un catálogo a partir del rango de temperatura a la cual operará el horno.

5.6.1 Termopar. También llamadas termocuplas son sensores de temperatura compuestos de dos materiales unidos en un extremo, en presencia de temperatura se genera un pequeño voltaje del orden de mili voltios llamado efecto seebeck y efecto Thomson, se clasifican según la composición de los materiales y de los rangos de temperatura a los cuales estarán expuestas. La termocupla seleccionada por el diseñador es de tipo S como se observa en la imagen 36, el rango de temperatura que soporta va desde los 0°C hasta los 1450°C como se observa en el anexo D, también cuenta con un polo positivo compuesto por una aleación de 10% rodio y 90% platino, y un polo negativo compuesto por un alambre de platino.

Imagen 36.
Termocupla tipo s

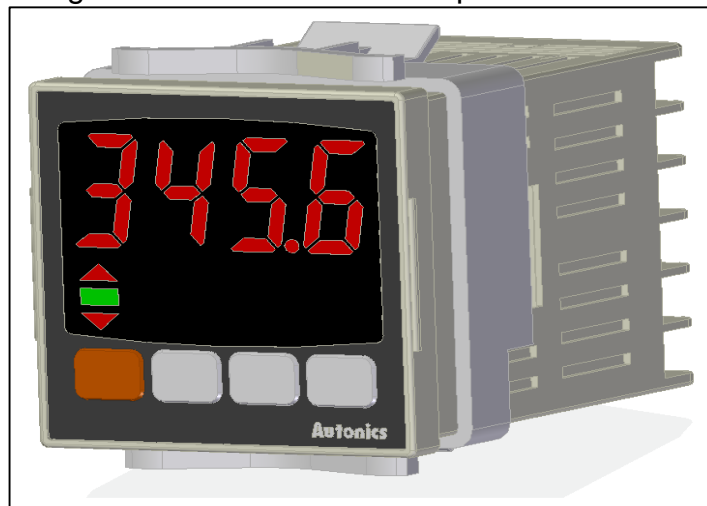


Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar en la imagen 57, la termocupla se encuentra ubicada en la parte interna e inferior del horno haciendo contacto con la pared externa del crisol de grafito arcilla seleccionado anteriormente asegurando que cense la temperatura a la que está el material de carga en cada instante del proceso.

5.6.2 Controlador de temperatura. Este dispositivo ayuda a establecer un valor deseado de temperatura con la menor variación posible, recibe la señal que transmite la termocupla permitiendo que el usuario pueda visualizar a que temperatura está el horno por inducción, además cuenta con una señal de salida que al momento de llegar a la temperatura programada enviará una señal al suministro de corriente de la bobina cortando el paso de esta para su posterior apagado, para la selección de este controlador se debe tener en cuenta los rangos de operación y las entradas de los sensores termopares, se seleccionó un controlador con un rango de 0°C a 1600°C de la compañía Autonics como se observa en la imagen 37.

Imagen 37. Controlador de temperatura Autonics



Fuente: elaboración propia.

5.7 SOLDADURA

Los tipos de uniones mecánicas entre dos piezas, se clasifican en rígidas o móviles, dentro del tipo de estas uniones rígidas se encuentran divididas en, tipo fijas o desmontables, que para el caso de la soldadura se encuentra dentro del tipo de uniones fijas. La soldadura es un proceso de unión de materiales en el cual se funden las superficies en contacto de dos o más piezas mediante la aplicación conveniente de calor y/o presión ²².

El proceso de soldadura es ampliamente utilizado para el ensamble de piezas estructurales a nivel industrial desde el sector de la construcción hasta el sector automotriz, debido a que es eficiente, y económico para para la unión de metales. Como se muestra en la imagen 38 se muestra un ejemplo del proceso de soldadura.

²²GROOVER, Mikell P. Fundamento de manufactura moderna. Tercera edición. Ciudad de México. McGraw Hill/Interamericana editores, 2007. p. 689.

Imagen 38. Proceso de soldadura



Fuente: THE FABRICATOR. Illinois. Creando un ambiente de soldadura seguro. [citado: 30 de octubre de 2015]. Disponible en: <https://www.thefabricator.com/spanish/creando-un-ambiente-de-soldadura-seguro>.

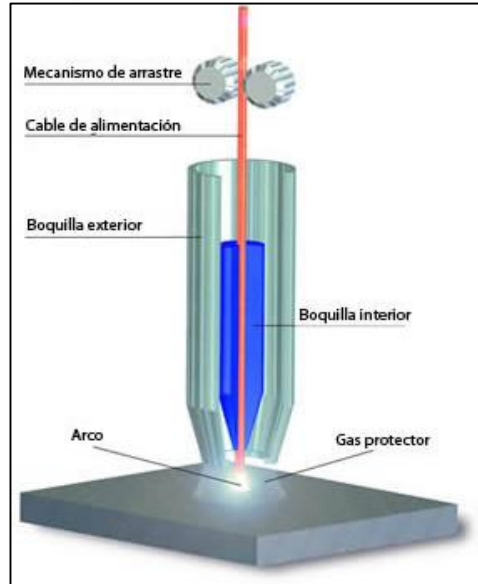
Los procesos de soldadura se subdividen en las siguientes tres categorías: por arco, por resistencia, por fusión y por último con oxígeno y/o gas combustible. Cada una presenta características importantes.

El proceso de soldadura por arco, se realiza por fusión en el cual la coalescencia de los metales se obtiene mediante el calor de un arco eléctrico entre un electrodo y la pieza de trabajo²³, Dentro de este proceso se encuentra la soldadura con arco de metal y gas, el cual, se desarrolla mediante el suministro de un alambre metálico consumible que actúa como electrodo, a su vez es suministrado un gas que proporciona protección a la soldadura, este tipo de soldadura también es conocido como soldadura MIG.

5.7.1 Ensamble de la carcasa del horno mediante soldadura. Para el ensamble de la carcasa del horno es preciso tener en cuenta que la lámina seleccionada es de aluminio con un espesor de 3mm. Dicho lo anterior a espesores de esa magnitud, la soldadura MIG es la más óptima, teniendo en cuenta que el electrodo debe ser un alambre de aleación de aluminio para que la pieza de trabajo no se vea afectada por las fluctuaciones que se pudieran generar, para el caso del gas la mejor opción es el argón debido a que se caracteriza por su factor de limpieza alto optimizando el proceso.

²³ GROOVER, Mikell P. Fundamento de manufactura moderna. Tercera edición. Ciudad de México. McGraw Hill/Interamericana editores, 2007. p. 706.

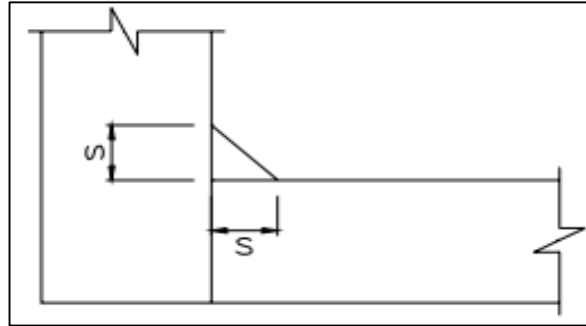
Imagen 39. Soldadura MIG



Fuente: DE MAQUINAS Y HERRAMIENTAS. Introducción a la soldadura MIG. [Citado: 23 de julio de 2011]. Disponible en: <https://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/soldadura-mig>.

5.7.2 Consumo de soldadura para el ensamble de la carcasa del horno por inducción. Para el ensamble del horno se tiene en cuenta que el espesor de la lámina no sobrepasa los 6 mm, de acuerdo a esto, al valor del cordón o chaflán, corresponde a 3 mm. El tipo de uniones con él se trabajará es de chaflán de lados iguales como se muestra en la imagen 40.

Imagen 40. Esquema de chaflán de soldadura (lados iguales)



Fuente: KBELCO. ABC de la soldadura por arco. [citado: 15 de febrero de 2000]. Disponible en: http://www.kobelco-welding.jp/espanol/education-center/abc/ABC_2000-01.html.

Donde, S, es el tamaño del chaflán, siendo valor determinante para hallar el área de la sección transversal de la soldadura. La ecuación de dicha área está dada por²⁴:

$$CSA = \frac{1}{2}(S)^2 \quad (m^2)$$

Donde;

S= Tamaño del chaflán.

Teniendo el área, se procede a multiplicar por la longitud del cordón, para hallar el volumen de la soldadura, luego se multiplica por la densidad para de esta forma hallar la masa, hallando el consumo de soldadura, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$Consumo = (CSA * l_{cordon}) * \gamma_{Aluminio} \quad (kg)$$

Donde;

l_{cordon} = Longitud del cordón.

$\gamma_{Aluminio}$ = Densidad del aluminio.

Teniendo las ecuaciones establecidas se procede a realizar los cálculos para hallar el consumo necesario de soldadura que necesita el horno por inducción para los elementos del diseño que van unidos.

²⁴ JEFFUS, Larry. Soldadura: principios y aplicaciones. Quinta edición. Madrid. Editorial paraninfo, 2009. p. 502.

Desarrollo de ecuaciones para hallar el consumo de soldadura para el horno por inducción.

Como primera medida se procede con el cálculo del área de la sección transversal como dato de entrada, debido que las zonas soldadas presentan las mismas propiedades. Como se evidencia a continuación, dicha área queda estandarizada con la siguiente ecuación.

$$CSA = \frac{1}{2}(S)^2$$

$$CSA = \frac{1}{2}(3mm)^2$$

$$CSA = 4,5 \text{ mm}^2$$

$$CSA = 0,0000045 \text{ m}^2$$

Como se muestra en la tabla 12, se puede observar los datos de entrada necesarios para el correcto desarrollo de todas las ecuaciones anteriormente explicadas.

Tabla 12. Datos de entrada para cálculo de consumo

Calculo de consumo de soldadura (datos de entrada)		
Densidad del aluminio	2700	kg/m^3
Tamaño del chaflán	3	mm
Área transversal del cordón	4,5	mm^2
	0,0000045	m^2

Fuente: elaboración propia

5.7.3 Consumo para la carcasa del cuerpo y tapa del horno. La longitud del cordón para esta zona es de 40 mm, definida a partir del diseño del horno, teniendo hallada el área de sección transversal del cordón, por lo que se procede hallar el perímetro para conocer el valor de la longitud del cordón.

$$P_{carcasa} = \pi * D_{in\ carcasa} \quad (m)$$

Donde;

$P_{carcasa}$ = Perímetro de la carcasa.

$D_{in carcasa}$ = Diámetro interno de la carcasa.

Teniendo la ecuación del perímetro de la carcasa explicada se procede a conocer dicho valor, como se muestra a continuación.

$$P_{carcasa} = \pi * (230,8 \text{ mm}) = 725,079 \text{ mm}$$

$$P_{carcasa} = 0,725079 \text{ m}$$

Teniendo este valor, a continuación, se procede a calcular el valor del consumo de soldadura para la carcasa del cuerpo y la tapa del horno con las formulas explicadas anteriormente. Dichos consumos se pueden observar en la siguiente tabla 13.

Tabla 13. Consumo de soldadura en cuerpo y tapa del horno

Consumo de soldadura en la "cuerpo y tapa"		
Diámetro interno de la carcasa	230,8	mm
Long. Cordón carcasa	725,079584	mm
	0,72507958	m
Consumo en la carcasa	0,00880972	kg
Consumo en la tapa	0,00880972	kg
Consumo total	0,01761943	kg

Fuente: elaboración propia.

Como se evidencia en la tabla 13, el total del consumo de soldadura para el cuerpo y la tapa es de 0,01761 Kg.

5.7.4 Consumo para la platina-porta tornillo que se ubica en el cuerpo. Por diseño la longitud del cordón de soldadura corresponde a un valor de 40mm, para el ensamble de esta platina teniendo en cuenta que son 2 unidades de este elemento, se procede a calcular el valor del consumo de soldadura con las formulas explicadas anteriormente. Dichos consumos se pueden observar en la tabla 14.

Tabla 14. Consumo de soldadura para la platina-porta tornillo ubicada en el cuerpo

Consumo de soldadura "platina-porta tornillo cuerpo"		
Long. Cordón carcasa	40	<i>mm</i>
	0,04	<i>m</i>
Consumo en la carcasa	0,000486	<i>Kg</i>
Consumo total	0,000972	<i>Kg</i>

Fuente: elaboración propia.

Como se evidencia en la tabla 14, se evidencia un total de consumo de soldadura para esa zona, corresponde a un valor de 0,000972 kg.

5.7.5 Consumo para la platina-porta tornillo que se ubica en la tapa. Por diseño la longitud del cordón de soldadura corresponde a un valor de 28mm, para el ensamble de esta platina teniendo en cuenta que son 2 unidades de este elemento, se procede a calcular el valor del consumo de soldadura con las formulas explicadas anteriormente. Dichos consumos se pueden observar en la tabla 15.

Tabla 15. Consumo de soldadura para la platina-porta tornillo ubicada la tapa

Consumo de soldadura "platina-porta tornillo tapa"		
Long. Cordón carcasa	28	<i>mm</i>
	0,028	<i>m</i>
Consumo en la carcasa	0,0003402	<i>kg</i>
Consumo total	0,0006804	<i>kg</i>

Fuente: elaboración propia.

Como se evidencia en la tabla 15, se evidencia un total de consumo de soldadura para esa zona, corresponde a un valor de 0,0006804 kg.

5.7.6 Consumo para la parte inferior de la base. Por diseño la longitud del cordón de soldadura se define de la siguiente manera, con la siguiente ecuación.

$$l_{bi} = (l_b * 2) + (l_a * 2) \quad (m)$$

Donde;

l_{bi} = Longitud de la parte inferior de la base del horno.

l_b = Longitud de la base.

l_a = Longitud de la altura.

Se procede hallar el valor de la longitud total de la parte inferior de la base del horno. Como se muestra a continuación.

$$l_{bi} = (500mm * 2) + (505mm * 2)$$

$$l_{bi} = 2010 \text{ mm}$$

$$l_{bi} = 2,01 \text{ m}$$

Teniendo la longitud definida, se procede a calcular el valor del consumo de soldadura con las formulas explicadas anteriormente. Dichos consumos se pueden observar en la tabla 16.

Tabla 16. Consumo de soldadura para la parte inferior de la base de horno

Consumo de soldadura "base - inferior"		
Long. Cordón carcasa	2010	<i>mm</i>
	2,01	<i>m</i>
Consumo en la carcasa	0,0244215	<i>kg</i>
Consumo total	0,0244215	<i>kg</i>

Fuente: elaboración propia.

Como se evidencia en la tabla 16, se observa un consumo total de soldadura para esta zona, con un valor de 0,02442 kg.

5.7.7 Consumo para los laterales de la base. Por diseño la longitud del cordón de soldadura se define de la siguiente manera, con la siguiente ecuación.

$$l_{laterales} = (l_{li} * 2) + (l_{al} * 2) \quad (m)$$

Donde;

$l_{laterales}$ = Longitud de los laterales de la base del horno.

l_{li} = Longitud inclinada de los laterales de la base.

l_{al} = Longitud de la altura de los laterales.

Por diseño se obtiene una longitud inclinada de 159,76mm, dato proceder hallar el valor de la longitud total de los laterales de la base del horno. Como se muestra a continuación.

$$l_{laterales} = (159.76mm * 2) + (150mm * 2)$$

$$l_{laterales} = 619,52 \text{ mm}$$

$$l_{laterales} = 0,61952 \text{ m}$$

Teniendo la longitud definida, se procede a calcular el valor del consumo de soldadura con las formulas explicadas anteriormente. Dicho consumo se puede observar en la tabla 17.

Tabla 17. Consumo de soldadura de los laterales de la base del horno

Consumo de soldadura "base - laterales"		
Long. Cordón carcasa	619,52	mm
	0,61952	m
Consumo en la carcasa	0,00752717	kg
Consumo total	0,01505434	kg

Fuente: elaboración propia.

Como se evidencia en la tabla 17, se observa un consumo un total de soldadura para esa zona, que corresponde a un valor de 0,01505 kg.

5.7.8 Consumo para la parte superior de la base del horno. Por último, se procede a calcular el consumo de soldadura para la parte superior de la base, teniendo en cuenta una longitud del cordón de soldadura, la cual se define de la siguiente manera.

$$l_{sb} = (l_{bs} * 2) + (l_{as} * 2) \quad (m)$$

Donde;

l_{sb} = Longitud total de la parte superior de la base del horno.

l_{bs} = Longitud base de la parte superior de la base del horno.

l_{al} = Longitud de la altura de la parte superior de la base del horno.

Se procede hallar el valor de la longitud total de la parte superior de la base del horno. Como se muestra a continuación.

$$l_{sb} = (450mm * 2) + (500mm * 2)$$

$$l_{laterales} = 1900 \text{ mm}$$

$$l_{laterales} = 1,9 \text{ m}$$

Teniendo la longitud definida, se procede a calcular el valor del consumo de soldadura con las formulas explicadas anteriormente. Dicho consumo se puede observar en la tabla 18.

Tabla 18. Consumo de soldadura de los laterales de la base del horno

Consumo de soldadura "base - superior"		
Long. Cordón carcasa	1900	mm
	1,9	
Consumo en la carcasa	0,023085	m kg
Consumo total	0,023085	kg

Fuente: elaboración propia.

Como se evidencia en la tabla 18, se observa un consumo un total de soldadura para esa zona, que corresponde a un valor de 0,02308 kg.

5.7.9 Consumo total de soldadura. Como se evidencio anteriormente se realizaron los cálculos para cada zona soldada, por lo que se procede a totalizar el consumo de soldadura. En la tabla 19 se muestra el consumo total en kilogramos para el ensamble del horno.

Tabla 19. Consumo total de soldadura

Consumo total de soldadura		
Consumo Carcasa y Tapa	0,01761943	<i>kg</i>
Consumo "Platina - porta tornillo cuerpo"	0,000972	<i>kg</i>
Consumo "Platina - porta tornillo tapa"	0,0006804	<i>kg</i>
Consumo "Base - Inferior"	0,0244215	<i>kg</i>
Consumo "Base - Lateral"	0,01505434	<i>kg</i>
Consumo Base - Superior	0,023085	<i>kg</i>
Consumo total	0,08183267	<i>kg</i>

Fuente: elaboración propia.

Con los resultados obtenidos en la tabla 19, Se establece un consumo total de 0.08182 Kg de soldadura, los electrodos se pueden encontrar comercialmente en un rango de diámetro de 3/32" de pulgada hasta 1/8" de pulgada. La que mejor se nos adecua es de 3/32" de pulgada.

5.8 TRANSFERENCIA DE CALOR

El cálculo de la transferencia de calor en el horno por inducción asegura que la temperatura exterior sea menor a 50°C, temperatura máxima que puede soportar el cuerpo humano al contacto con superficies calientes.

Para dar inicio a los cálculos se deben conocer los materiales de las paredes que conforman el horno, con sus respectivas características.

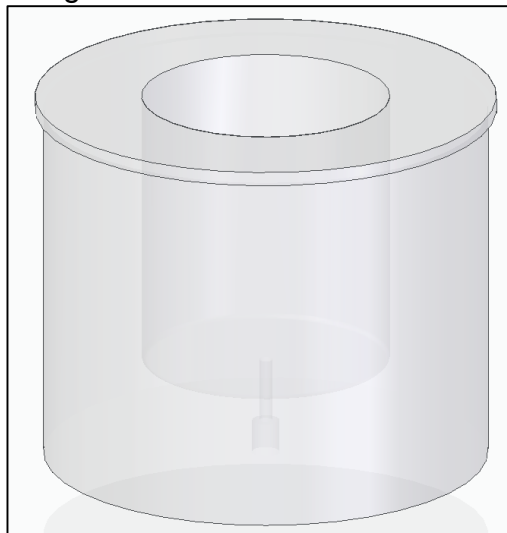
5.8.1 Selección de los aislantes. El cerámico que se puede apreciar en la imagen 41, seleccionado por el diseñador es de cuarzo, teniendo en cuenta las propiedades que posee se adaptan a los requerimientos de diseño, entre sus propiedades más importantes se encuentran.

- Conductividad térmica baja.
- Resistente a altas temperaturas.
- Gran capacidad de aislamiento.

El fabricante del crisol de 5kg anteriormente seleccionado suministra el cerámico de cuarzo estandarizado para dicho crisol, sus medidas son:

- A (Diámetro externo superior) = 165 mm.
- B (Diámetro exterior inferior) = 159 mm.
- C (Diámetro interior) = 89 mm.
- H (Altura total del crisol) = 135 mm.

Imagen 41. Cerámico de cuarzo

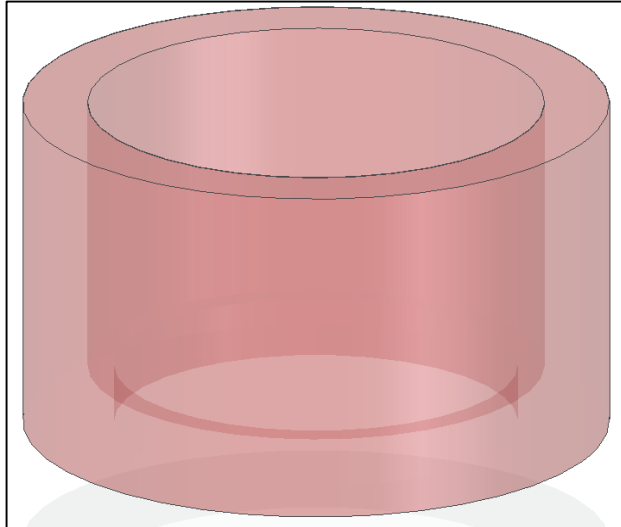


Fuente: elaboración propia.

Para el segundo material aislante se seleccionó una manta cerámica de fibra de óxido de silicio-alúmina, con excelentes propiedades aislantes para que el calor generado al interior del horno no se propague y llegue a quemar a los usuarios. Sus ventajas son:

- Resistente a choques térmicos.
- Flexible.
- Resistente a la corrosión.
- Resistente a ataques químicos.

Imagen 42. Manta cerámica

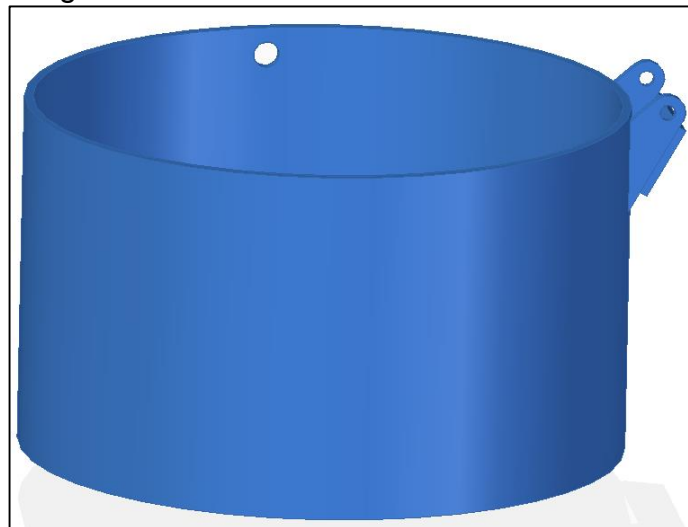


Fuente: elaboración propia.

En la imagen 42 se puede observar la manta cerámica que rodea la bobina, el fabricante de la manta cerámica tiene unas medidas estandarizadas para el espesor, la seleccionada es de 24,5 mm, como se puede apreciar en el anexo E.

5.8.2 Selección de la carcasa. Lo que se busca con esta carcasa es sostener y proteger la parte interna del horno como se puede observar en la imagen 43, el material para esta carcasa es aluminio y el espesor a utilizar es de 3 mm, teniendo en cuenta que es un espesor estándar de fácil acceso en el mercado.

Imagen 43. Carcasa



Fuente: elaboración propia.

5.8.3 Cálculo de temperaturas por resistencias en paredes cilíndricas. La energía necesaria en el proceso para la fundición del material de carga está dada por la siguiente ecuación.

$$Q_{global} = Q_s + Q_l \quad (J)$$

Donde:

Q_{global} = Calor global del sistema.

Q_s = Calor sensible.

Q_l = Calor latente.

Con el cálculo del calor sensible se determina la energía necesaria para elevar la temperatura de 23°C a 1200°C de cada material de carga, para este cálculo la ecuación es la siguiente.

$$Q_s = m_m * C * \theta_m \quad (J)$$

El calor latente provee la energía necesaria para el cambio de fase del material de carga en el sistema, para determinar el calor latente se utiliza la siguiente ecuación.

$$Q_l = m_m * C_{lf} \quad (J)$$

A partir de las anteriores ecuaciones se procede a realizar el cálculo del calor global con cada material de carga en el sistema.

Tabla 20. Calor global para el cobre

Cobre		
Descripcion	Valor	Unidad
Calor para elevar de 23 a 1100 °C	910998	J
	380	W
Energia cambio de fase	428000	J
	178	W
Calor global	558	W

Fuente: elaboración propia.

Tabla 21. Calor global para el bronce

Bronce		
Descripcion	Valor	Unidad
Calor para elevar de 23 a 1100 °C	886045,6	J
	369	W
Energia cambio de fase	460000	J
	192	W
Calor global	561	W

Fuente: elaboración propia.

Tabla 22. Calor global para el latón

Latón		
Descripcion	Valor	Unidad
Calor para elevar de 23 a 1100 °C	887458	J
	370	W
Energia cambio de fase	336000	J
	140	W
Calor global	510	W

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en las tablas 13, 14 y 15 el calor generado por cada material de carga, es distinto por sus propiedades físicas.

Teniendo en cuenta el calor global calculado anteriormente, se procede a calcular la transferencia de calor por conducción de paredes en estado estacionario mediante resistencias térmicas en sistemas cilíndricos, mediante la siguiente formula²⁵:

$$Q_{global} = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (w)$$

Donde:

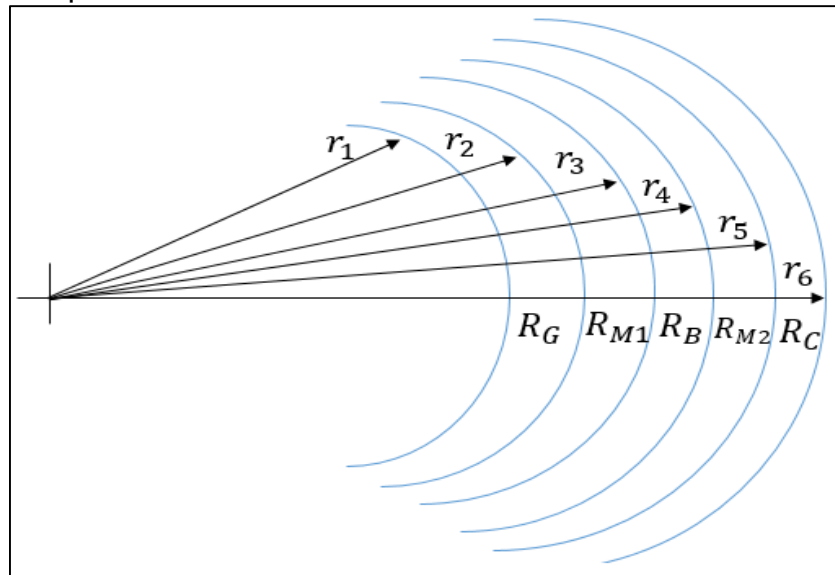
T_1 = Temperatura inicial de cada pared.

T_2 = Temperatura final de cada pared.

R = Resistencia térmica de cada pared.

²⁵ CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. Tercera edición. Ciudad de México. McGraw Hill/Interamericana editores, 2007. p. 150.

Imagen 44. Representación de distribución de las resistencias térmicas en las paredes cilíndricas que componen el horno.



Fuente: elaboración propia.

En la imagen 44, se muestra la disposición de las paredes que tiene el horno por inducción, donde:

- Rg= La resistencia del crisol de grafito.
- Rm1= La resistencia de la manta 1.
- RB= La resistencia de la bobina.
- Rm2= La resistencia de la manta 2.
- Rc= La resistencia de la carcasa.

La resistencia térmica esta expresada de la siguiente manera²⁶.

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * l_{bobina} * K} \left(\frac{k}{w}\right)$$

Donde

r₁= Radio menor de la pared.

r₂Radio mayor de la pared.

K= Conductividad térmica dl material de cada pared.

²⁶ CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. Tercera edición. Ciudad de México. McGraw Hill/Interamericana editores, 2007. p. 151.

Una vez seleccionados los materiales aislantes que confirmaran el horno y teniendo en cuenta los valores de los calores globales establecidos en las tablas 9, 10 y 11 se continua con el cálculo de la transferencia de calor emitido por el horno con el material que emite mayor calor es el bronce.

Con las propiedades del material mencionadas en la tabla 2, se reemplaza los valores en las ecuaciones para el cálculo de la transferencia mencionadas anteriormente.

Es necesario conocer la resistencia térmica que maneja el crisol. Utilizando la fórmula de la resistencia térmica.

$$R_g = \frac{\ln\left(\frac{0,045 \text{ m}}{0,0345 \text{ m}}\right)}{2 * \pi * 0,130 \text{ m} * 58 \frac{\text{w}}{\text{m*k}}}$$

$$R_g = 5,608 \times 10^{-3} \frac{\text{k}}{\text{w}}$$

Con la resistencia del material calculada, se determina la temperatura.

$$561 \text{ w} = \frac{1200 \text{ }^\circ\text{C} - T_2}{5,608 \times 10^{-3} \frac{\text{k}}{\text{w}}}$$

$$T_2 = 1196,85 \text{ }^\circ\text{C}$$

El fabricante establece que el radio del cerámico de cuarzo es de 35 mm. Con este valor se calcula el valor de la resistencia térmica para dicho material.

$$R_{m1} = \frac{\ln\left(\frac{0,080 \text{ m}}{0,045 \text{ m}}\right)}{2 * \pi * 0,130 \text{ m} * 1,1 \frac{\text{w}}{\text{m*k}}}$$

$$R_{m1} = 0,640 \frac{\text{k}}{\text{w}}$$

Teniendo en cuenta el radio exterior de la bobina de cobre seleccionado anteriormente, se halla la resistencia térmica de la bobina de cobre, utilizando las propiedades del material de la bobina en este caso de cobre.

$$R_B = \frac{\ln\left(\frac{0,09004 \text{ m}}{0,080 \text{ m}}\right)}{2 * \pi * 0,130 \text{ m} * 352 \frac{\text{w}}{\text{m*k}}}$$

$$R_B = 4,250 \times 10^{-4} \frac{k}{w}$$

Establecida la resistencia térmica de la bobina de cobre, se desea saber la temperatura en la pared externa.

$$561 w = \frac{40 \text{ }^\circ\text{C} - T_4}{4,250 \times 10^{-4} \frac{k}{w}}$$

$$T_4 = 39,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

El fabricante establece que el radio de la manta es de 25,4 mm. Con este valor se calcula el valor de la resistencia térmica para dicho material.

$$R_{m2} = \frac{\ln\left(\frac{0,09258 \text{ m}}{0,09004 \text{ m}}\right)}{2 * \pi * 0,130 \text{ m} * 0,037 \frac{w}{m*k}}$$

$$R_{m2} = 0,9204 \frac{k}{w}$$

Teniendo en cuenta que se cuenta con los radios de la carcasa seleccionado anteriormente, se halla la resistencia térmica de la carcasa, utilizando las propiedades del material.

$$R_c = \frac{\ln\left(\frac{0,09558 \text{ m}}{0,09258 \text{ m}}\right)}{2 * \pi * 0,130 \text{ m} * 205 \frac{w}{m*k}}$$

$$R_c = 1,904 \times 10^{-4} \frac{k}{w}$$

Establecida la resistencia termina de la carcasa, se desea saber la temperatura en la pared externa, teniendo en cuenta que esta temperatura será la temperatura que entrará en contacto con el operario encargado de esta labor.

$$558 w = \frac{27 \text{ }^\circ\text{C} - T_6}{1,904 \times 10^{-4} \frac{k}{w}}$$

$$T_6 = 26.89 \text{ }^\circ\text{C}$$

La temperatura final es de 26,89°C, la cual cumple con las expectativas del diseñador, donde se estableció que la temperatura deberá ser menor a 50°C, para evitar quemaduras a los operarios encargados de manejar el horno por inducción.

5.9 PINZAS DE LABORATORIO

Las pinzas de crisoles, son instrumentos de laboratorio clasificados dentro de la familia de los metálicos, con diferentes diseños de sujeción que cumplen la función de sostener y/o manipular otros elementos de laboratorio, como lo son: los crisoles, las buretas, los tubos de ensayos, entre otros. Las pinzas de crisoles están fabricadas a partir de aleaciones inertes presentando una alta resistencia mecánica, es un instrumento tanto de operación como de seguridad, como se puede observar en la imagen 45.

Imagen 45. Manipulación de crisoles mediante pinzas



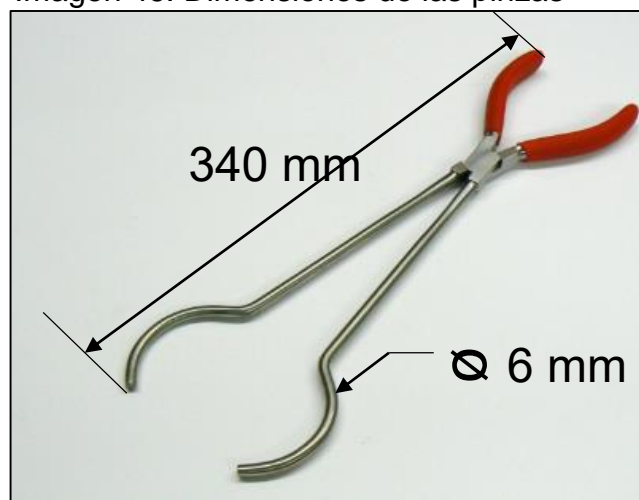
Fuente: TP LABORATORIO QUÍMICO. Pinza de crisol. [citado: 05 septiembre de 2018]. Disponible en:<https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/materiales-e-instrumentos-de-un-laboratorio-quimico/pinza-de-crisol.html>.

Las pinzas se seleccionaron cumpliendo una serie de parámetros de seguridad para el operador ya que se está interactuando con metales en punto de fusión a elevadas temperaturas, su diseño se puede observar en la imagen 46.

Como se puede observar en la imagen 46, su diseño consiste en una geometría tipo alicate, sus dimensiones son:

- Longitud total: 340 mm.
- Longitud del mango: 130 mm.
- Diámetro del material: 6 mm.
- Diámetro máximo de sujeción: 73.02 mm.
- Fabricado en material de acero inoxidable, los mangos de las pinzas presentan un material plástico tipo PVC antideslizante.
- Soporta un peso de 6-8kg.

Imagen 46. Dimensiones de las pinzas



Fuente. elaboración propia.

Por lo anterior tanto la geometría como los materiales de los cuales está hecha dicha pinza cumple con los requerimientos de la aplicación además son adecuadas para evitar riesgos al momento de la extracción y vertimiento del material fundido, las características anteriormente mencionadas se pueden observar en el anexo F.

5.10 PESO Y DIMENSIONES DEL HORNO

Teniendo en cuenta los materiales que componen el horno por inducción que van desde lámina de aluminio hasta tornillos, entre otros. Se determina el peso del equipo corresponde a un valor de 21,46 Kg. Este valor incluye el peso del equipo de refrigeración. Por otro lado, el volumen que ocupara el horno por inducción incluyendo el sistema de refrigeración es de (1,5 m X 0,8 m X 1,2 m), se recomienda que el equipo en su totalidad sea transportado en un carro pequeño de carga hasta el lugar de su instalación.

6. MANUALES

El correcto funcionamiento del horno por inducción depende de una buena operación por parte de los operarios encargados del laboratorio, junto al manejo por parte de los estudiantes; el mantenimiento juega parte indispensable ya que será realizado por parte de los operarios con los que cuenta la universidad, por este motivo debe ser un mantenimiento sencillo.

Se recomienda seguir cuidadosamente estos manuales ya que de esto depende la funcionalidad y mantenimiento de la misma.

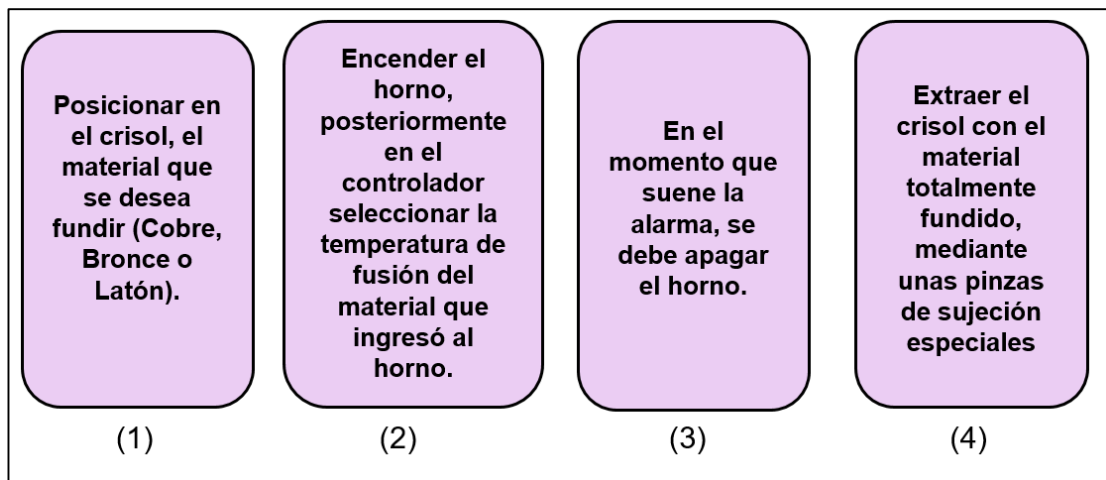
6.1 MANUAL DE OPERACIÓN

En este manual se describen los pasos uno a uno que se deben de llevar a cabo para el óptimo rendimiento del horno, de esta manera garantizando el buen funcionamiento, se aconseja que durante la operación del horno siempre este supervisado por personal capacitado para esta labor, ya que, al tratarse de un horno destinado para laboratorios universitarios, entra a jugar la integridad de los estudiantes.

Otro punto a tener en cuenta son las normas de seguridad que se deben cumplir en su totalidad, teniendo en cuenta que se manejaran altas temperaturas, lo suficiente para causar grandes daños a la integridad física tanto del operario, como el de los estudiantes y demás participantes presentes en cada laboratorio.

En el cuadro 1 se muestra el proceso de funcionamiento que se debe seguir para la operación del horno por inducción.

Cuadro 1. Proceso de funcionamiento

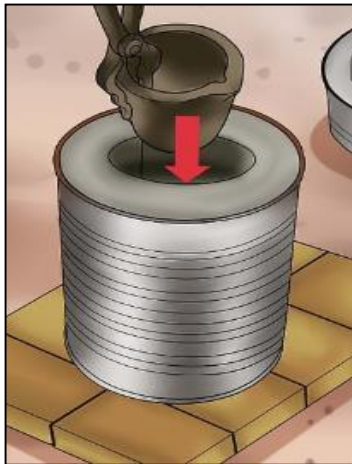


Fuente: elaboración propia.

Una vez definidos los pasos que se deben realizar para el buen funcionamiento del horno, se darán algunas recomendaciones en cada uno de los pasos.

En el primer paso, antes de posicionar el material dentro del crisol, es garantizar que el horno se encuentre totalmente apagado, a su vez asegurarse que el horno esté libre de temperaturas cercanas o mayores a 40°, de esta manera asegurando la integridad física del personal que se encuentre manipulándolo.

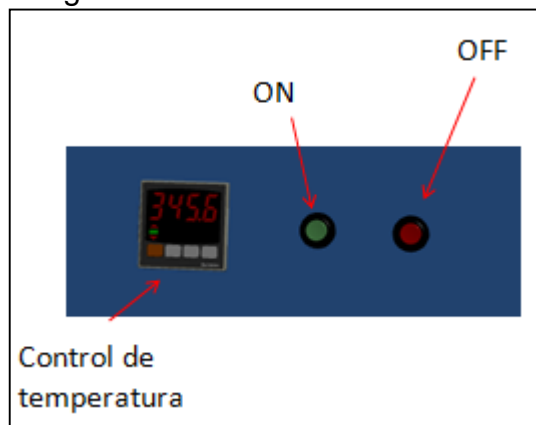
Imagen 47.
Posicionamiento del material



Fuente: WIKIHOW.
Como fundir cobre.
[citado: 29 octubre de
2018]. Disponible en:
<https://es.wikihow.com/fundir-cobre>.

En el segundo paso, el operario, una vez posicionado el material, puede proceder a encender el horno, debe subir la temperatura manipulando el tablero de control, que se puede observar en la imagen 48, teniendo en cuenta el tipo de material que se desea manejar, garantizando de esta manera la fundición total.

Imagen 48. Tablero de control



Fuente: elaboración propia.

En el tercer paso, transcurridos 40 minutos sonará la alarma, en este momento el material está totalmente fundido, el horno deberá ser apagado con el fin que al retirar el material el horno por inducción no se encuentre en funcionamiento, como se puede observar en la imagen 49.

Imagen 49. Botón de apagar



Fuente: elaboración propia.

En el cuarto paso, una vez el horno por inducción complete su función se dispone a retirar el material, retirando el crisol del interior del horno, esto se realizará mediante las pinzas, como se puede observar en la imagen 50.

Imagen 50. Pinzas de extracción del crisol



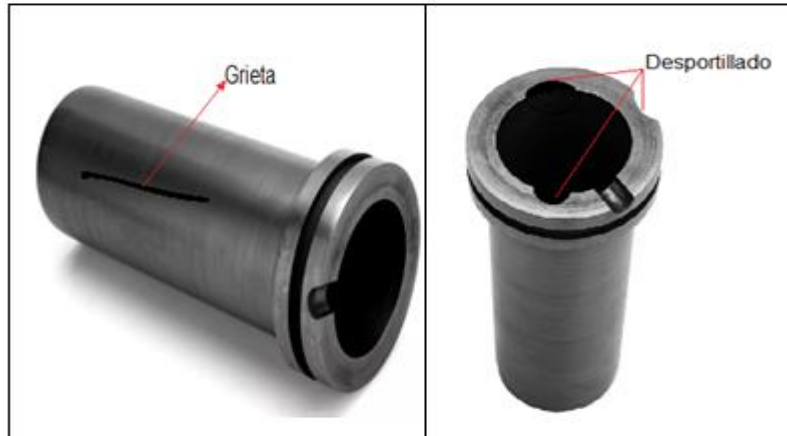
Fuente: WIKIHOW. Como fundir latón. [citado:03 noviembre de 2018]. Disponible en: <https://es.wikihow.com/fundir-lat%C3%B3n>.

6.2 MANUAL DE MANTENIMIENTO

Del buen mantenimiento que se realice dependerá el buen funcionamiento, de igual manera la conservación y la vida útil del horno por inducción, en este manual el encargado del mantenimiento encontrará las posibles acciones que debe tener en cuenta en el momento de realizarlo, cumpliendo cada uno de los pasos que se describirán a continuación.

6.2.1 Mantenimiento del crisol. Al tratarse de un material cerámico su mantenimiento en simple, básicamente consiste en una limpieza interna del crisol con barniz, en su parte exterior realizar una limpieza periódica, teniendo en cuenta que el crisol maneja una alta temperatura, esta limpieza debe realizarse con el material completamente frío. También se debe realizar una inspección visual, para percibir grietas o desportillado en alguna parte como se observa en la imagen 51, de ser así debe ser sometido a un cambio total del crisol.

Imagen 51. Posibles fallas del crisol



Fuente: elaboración propia.

6.2.2 Mantenimiento de la bobina. Por tratarse de una parte sometida a altas vibraciones se recomienda revisar semanalmente el apriete de tornillos que sujetan la bobina, por otra parte, al estar sometida a altas temperaturas se recomienda cada año desmontar el núcleo en su totalidad, de esta manera limpiar o remplazar si es necesario tornillería o remaches de sujeción.

6.2.3 Mantenimiento de acoples eléctricos. Se debe realizar una inspección semanal de los contactos eléctricos del horno, revisando de manera visual peladuras en los cables, obstrucciones y la limpieza de los mismos evitando de esta manera posibles cortos, o el mal funcionamiento del sistema.

6.2.4 Mantenimiento de la termocupla. No requieren un mantenimiento riguroso, con verificar si está bien conectada es suficiente, esto se puede realizar de forma visual por parte del encargado del laboratorio.

En el caso de llegar a dañarse la termocupla, se aconseja el cambio total de la pieza, teniendo en cuenta las horas de operación o como lo recomienda el proveedor cada año.

6.2.5 Mantenimiento de la carcasa. Se recomienda semanalmente revisar tornillería, ajustando las piezas que se noten un poco sueltas.

En caso de presentar abolladuras, golpes o raspaduras y teniendo en cuenta que la carcasa estará recubierta con una capa de anticorrosivo, se recomienda pulir y recubrir nuevamente la zona dañada, de esta manera evitando daños más profundos en el horno.

6.2.6 Actividades de mantenimiento. En el cuadro 2, se mencionan algunos pasos y actividades que se deben tener en cuenta para desarrollar el programa de mantenimiento y la frecuencia en la que se deben realizar.

Cuadro 2. Actividades de mantenimiento

Componente	Actividad	Frecuencia			
		Diario	semanal	mensual	Anual
Crisol	Inspección visual del estado físico				
	Limpieza interna				
	Limpieza externa				
Bobina	Apriete de tornillería				
	Desmontaje del núcleo				
Acoples eléctricos	Peladuras				
	Limpieza				
Termocupla	Revisar conexiones				
	Cambio de termocupla				
Carcasa	Apriete de tornillería				
	Golpes, rapaduras				

Fuente: elaboración propia.

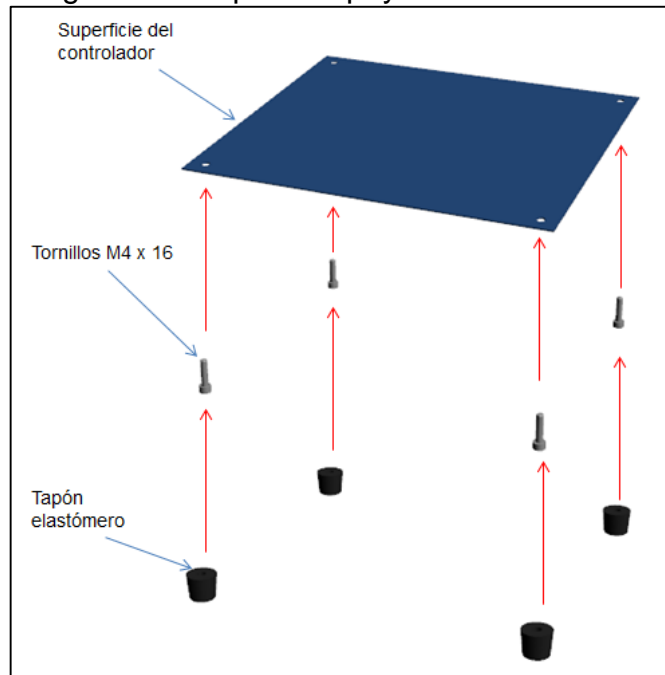
6.3 MANUAL DE ENSAMBLE.

En el manual de ensamble se establece una serie de pasos para realizar el ensamble debido de cada una de las piezas que componen el horno por inducción, se debe seguir al pie de la letra cada paso para garantizar que el horno esté listo para su posterior operación. Se recomienda que el personal que realice el montaje esté capacitado para dicha labor.

El primer paso que se debe realizar es el montaje del tablero de control, ya que sobre este estará ubicado el horno por inducción.

Dicho esto, es necesario ensamblar los 4 tornillos M4 de 16 mm, a la superficie del tablero de control, una vez realizado esto, a cada uno de los tornillos se le ajustará una tapa de caucho como se puede observar en a imagen 52.

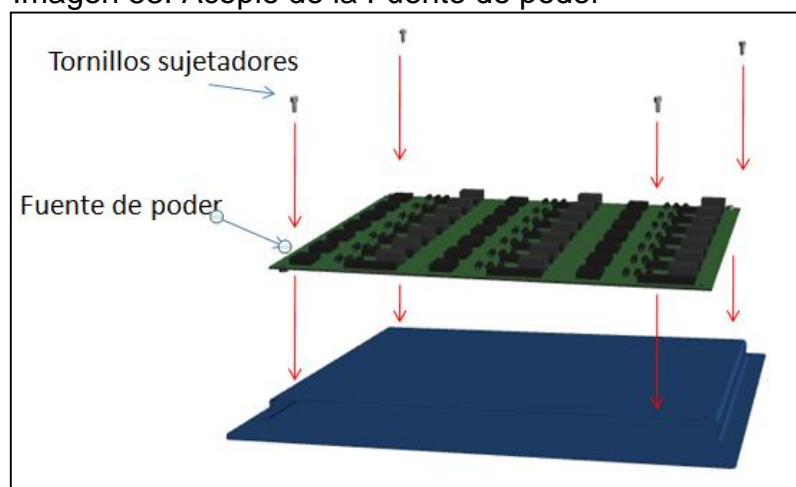
Imagen 52. Acople de apoyos del Horno



Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se ubica la fuente de poder sobre la superficie del tablero de control como se muestra en la imagen 53, mediante tornillos sujetadores.

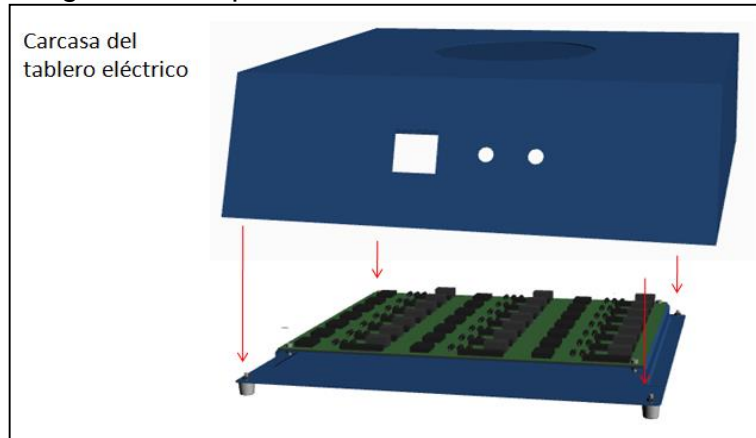
Imagen 53. Acople de la Fuente de poder



Fuente: elaboración propia.

Una vez la fuente de poder se encuentre en su posición, se encaja la carcasa del tablero eléctrico a la superficie, esto mediante los tonillos M4 ubicados anteriormente, como se puede observar en la imagen 54.

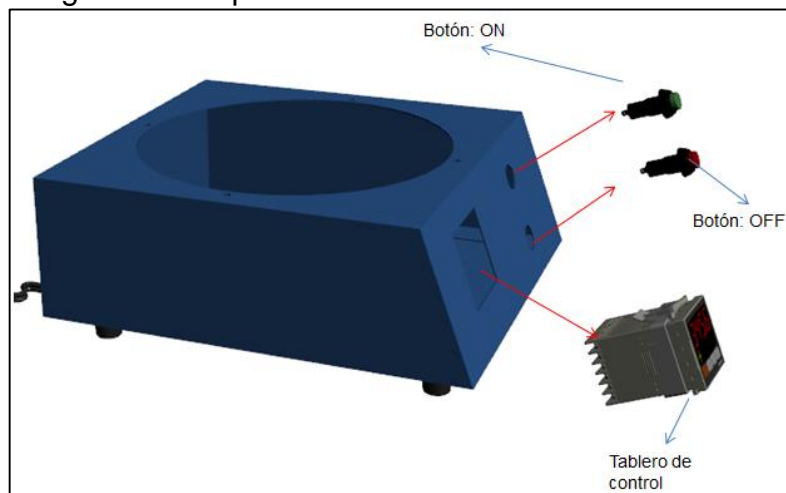
Imagen 54. Acople de la Carcasa del tablero eléctrico



Fuente: elaboración propia.

En el momento que la carcasa se encuentra totalmente sujeta, se procede a encajar el tablero de control junto a los botones de encendido y apagado del horno por inducción, como se puede apreciar en la imagen 55.

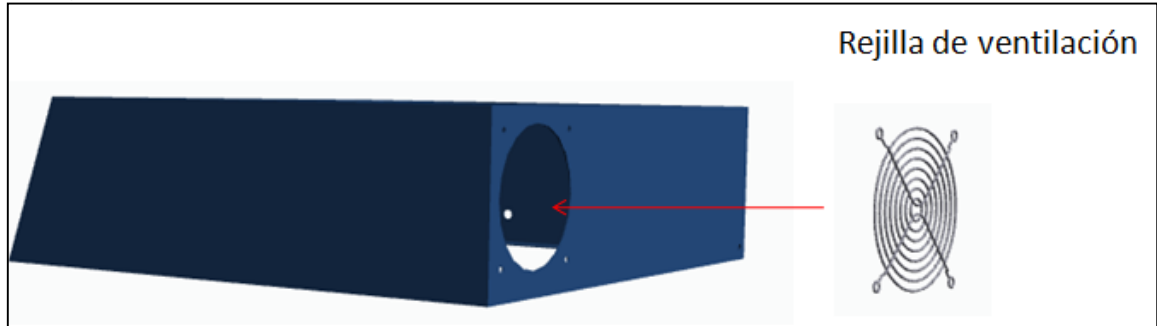
Imagen 55. Acople de los botones de mando



Fuente: elaboración propia.

En la parte trasera de la carcasa se ubica la ventilación del sistema, esta se ensamble mediante 4 tornillos, como se observa en la imagen 56.

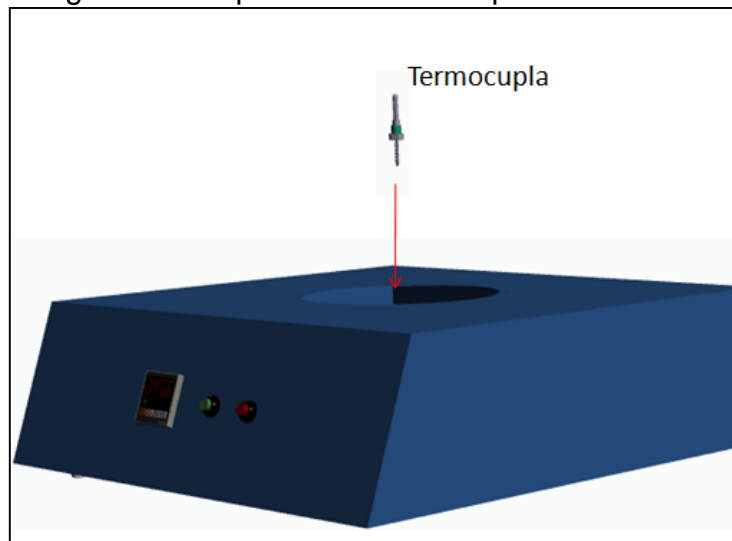
Imagen 56. Acople de la Rejilla de ventilación



Fuente: elaboración propia.

En el siguiente paso se debe ingresar la termocupla y ubicarla en el centro de la carcasa de horno, como se muestra en la imagen 57. esta se conecta al tablero de control de temperatura.

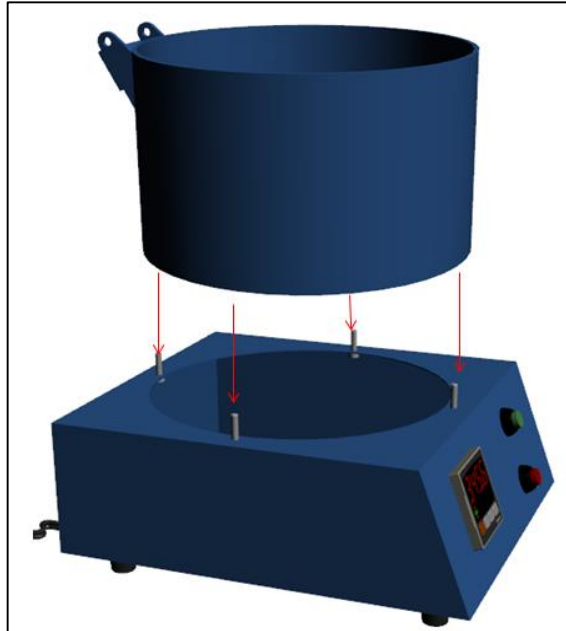
Imagen 57. Acople de la Termocupla



Fuente: elaboración propia.

Para realizar el montaje de la carcasa del horno se deben ingresar 4 tornillos M4 de mm cada uno, como puede apreciar en la imagen 58, los tornillos van ubicados dentro de la carcasa del tablero de control. Una vez ubicados los 4 tornillos, se encaja la carcasa del horno como se observa en la imagen.

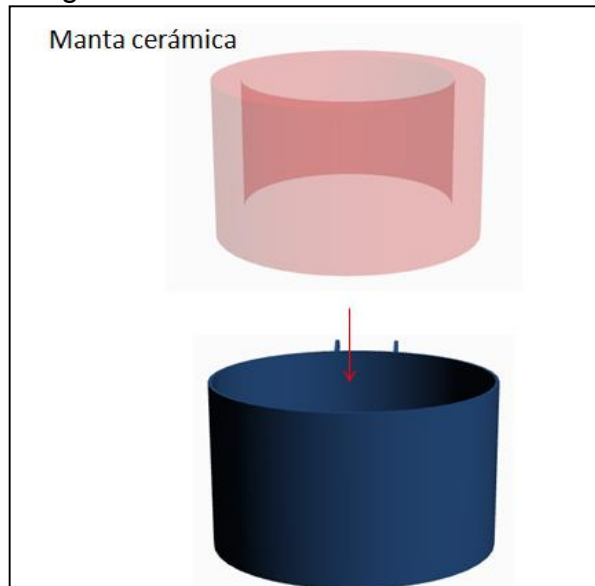
Imagen 58. Acople de la carcasa de la Bobina



Fuente: elaboración propia.

La manta cerámica se ingresa al interior de la carcasa del horno como se puede observar en la imagen 59, asegurando que las ranuras de ambas piezas coincidan.

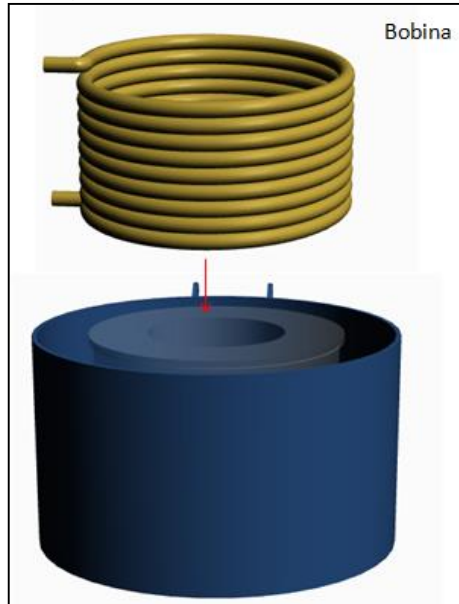
Imagen 59. Manta cerámica



Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se inserta la bobina cuidadosamente dentro de la manta cerámica, como se observa en la imagen 60.

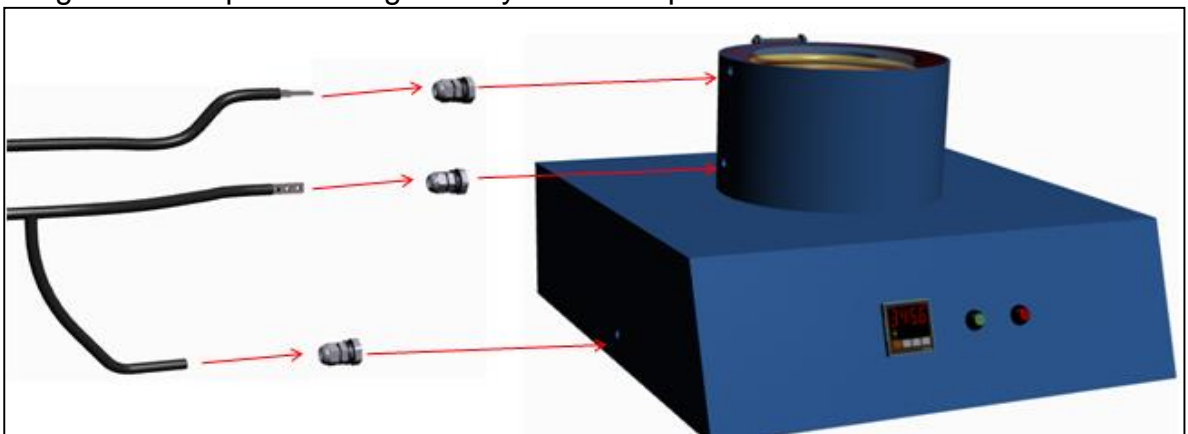
Imagen 60. Acople de la Bobina



Fuente: elaboración propia.

Con la bobina puesta en su lugar, se acopla la entrada y salida del refrigerante, y a su vez la conexión a la fuente de poder, como se puede observar en la imagen 61.

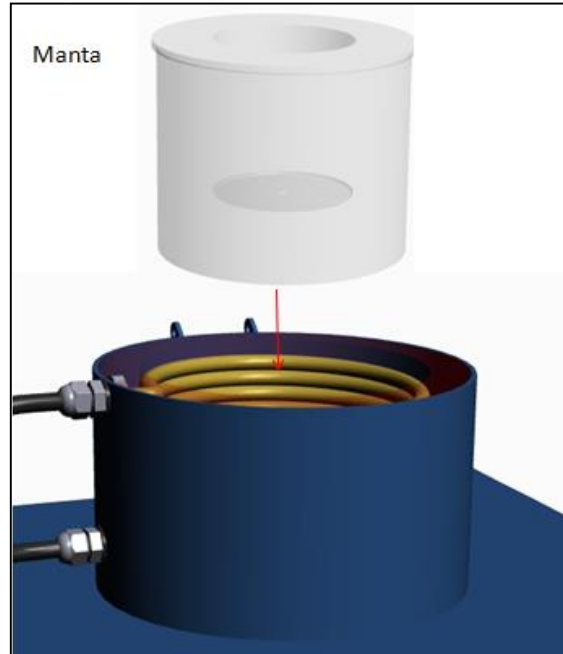
Imagen 61. Acople del refrigerante y fuente de poder a la bobina



Fuente: elaboración propia.

Con las mangueras ubicadas en su lugar, es hora de acoplar la siguiente manta, esto se realiza por la parte de arriba de la carcasa como se muestra en la imagen 62.

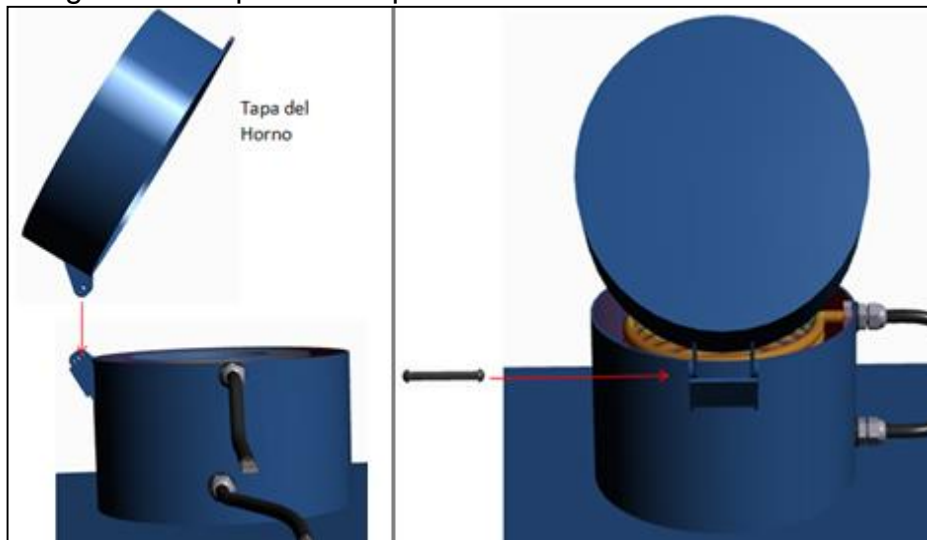
Imagen 62. Acople Cerámico



Fuente: elaboración propia.

Por ultimo queda ensamblar la tapa del horno, esta debe ir acoplada a la parte superior del horno como se muestra en la imagen 63, mediante un pasador liso.

Imagen 63. Acople de la tapa



Fuente: elaboración propia.

De esta manera termina el ensamble del Horno por inducción, siguiendo cuidadosamente los pasos mencionados anteriormente, se garantiza el buen funcionamiento del horno.

6.4 MANUAL DE SEGURIDAD

Este manual contiene advertencias de seguridad que deben ser consultadas previamente para la correcta operación evitando accidentes dentro del laboratorio.

El horno por inducción debe ser operado solamente por personal capacitado ya que existen, altos riesgos de accidentalidad, los cuales deben tener conocimientos sobre prácticas seguras en el laboratorio y el uso adecuado de los controladores, en el caso de los estudiantes aprendices deben estar bajo la supervisión de la persona encargada del equipo. Ya que existe varios riesgos por quemaduras o incendios

En la imagen 64, se ilustra los símbolos como señal de advertencia o peligro, el cual advierte sobre los posibles riesgos para el operario de la maquina o más personas que se encuentren cerca al espacio ocupado por el equipo.

Imagen 64. Simbología de advertencia



Fuente: INDUCTOTHERM. Guía de fundamentos de seguridad en la fundición por inducción que puede salvar su vida. [citado: 18 de enero de 2011]. Disponible en: <https://code.inductotherm.com/06%20Resources/Safety/M2573%20Rev%202.pdf>.

Para poder asistir a las prácticas e ingresar al recinto en el cual se encontrará el horno por inducción, el personal debe contar con los siguientes implementos:

- Guantes aluminizados: son implementos de laboratorio que protegen al operador de las altas temperaturas, salpicadura de metal líquido y radiación calorífica.

Imagen 65. Guantes aluminizados



Fuente: OSTOPACK.
Guante aluminizado
JUTEC. [citado:06
noviembre de 2018].
Disponible en:
<http://ostopack.com/ostopack/25-guante-aluminizado-jutec.html>.

- Careta de seguridad: elemento de protección facial, el cual se encarga de prevenir accidentes relacionados con salpicadura de agentes químicos y en especial para esta aplicación de fundición de metales a altas temperaturas.

Imagen 66. Careta de seguridad



Fuente: BOLETÍN INDUSTRIAL. Protector facial para altas temperaturas. [Citado: 7 enero de 2019]. Disponible en: <https://www.boletinindustrial.com/producto-imagen.aspx?pid=59722>.

- Traje aluminizado: traje especial para las buenas prácticas de laboratorio, que ayudan a proteger la ropa y la piel en caso de derrame de alguna sustancia química, capaz de soportar altas temperaturas debido al material en el que se encuentra fabricado.

Imagen 67. Traje aluminizado



Fuente: FEM S.A. Vulcano. [citado:7 enero de 2019]. Disponible en: http://fireequipmentmexico.com/Industrial_Vulcano.php.

- Mascarilla auto filtrante: son mascarillas especiales para la protección de las vías respiratorias cubriendo la boca, nariz y varillas, esto debido a que el metal fundido puede emitir gases nocivos para la salud.

Imagen 68. Mascarilla auto filtrante



Fuente: EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL. Protección de las vías respiratorias. Mascarilla filtrante de protección contra partículas (mascarilla autofiltrante). [citado:15 noviembre de 2018]. Disponible en: http://www.gencat.cat/empresai/ocupacio/departament/centre_d'ocuentacio/publicacions/seguiretat_salut_laboral/guies/lilibres/construccio_accessible/esp/08/08_08.pdf.

Lea atentamente las siguientes instrucciones antes de operar el equipo.

- Utilice los implementos de seguridad anteriormente explicados.
- No opere el horno con la tapa abierta.
- No introduzca ningún objeto inflamable adentro del horno cuando este encendido.
- Tenga precaución con el uso de agua, al momento de que el horno entre en funcionamiento en especial con los componentes electrónicos.
- Vierta el material fundido en áreas libres de obstáculos, designada por el docente.
- Mantenga las vías de acceso libre de cualquier obstáculo en caso de emergencia.
- Opere el equipo correctamente para lo que fue diseñado.
- Solo el personal capacitado está autorizado y apto para operar el equipo.

- Luego de finalizada la practica limpie la zona de trabajo que se dispuso para la práctica, dejando un ambiente limpio y seco.

7. EVALUACION FINANCIERA

En este capítulo se realizará una evaluación de costos entre “Diseño de un horno por inducción” desarrollado en el presente documento, teniendo en cuenta el diseño, la materia prima y mano de obra para su realización; contra el costo de un horno por inducción ya existente en el mercado con las mismas características.

7.1 COSTO DEL DISEÑO DE UN HORNO POR INDUCCION, MATERIA PRIMA Y MANO DE OBRA PARA SU REALIZACION.

En la siguiente tabla se tuvieron en cuenta las horas de tutorías y reuniones por parte de los diferentes docentes de la universidad, incluyendo las horas de reuniones con el orientador del proyecto y las horas por parte de los exponentes para el desarrollo del diseño.





Tabla 23. Costo desarrollo del diseño

Costo de desarrollo del diseño (Talento Humano)			
Descripción	Cantidad	Unidades	Precio (COP)
Tutoria con el orientador del proyecto	30	HORA	\$ 450.000,00
Proponentes	1500	HORA	\$ 10.500.000,00
TOTAL			\$ 10.950.000,00

Fuente: elaboración propia.

Para el caso de la siguiente tabla 24 se expondrán los costos de la materia prima, indicando la cantidad del artículo junto con sus unidades comerciales respectivamente.

Tabla 24. Costo de materia prima del diseño de un horno por inducción

COSTO DE MATERIA PRIMA DEL DISEÑO DE UN HORNO POR INDUCCION				
COMPONENTES	FIGURA	CANTIDAD	UNIDADES	PRECIO (COP)
Crisol + Ceramico		1	UN	\$ 413.700,00
Alambre conductor (Bobina)		1	UN	\$ 10.546.000,00
Manta ceramica		2	UN	\$ 978.000,00
Lamina Aluminio		1	UN	\$ 645.000,00
Sistema de control de temperatura + termocupla "tipo S"		1	UN	\$ 1.200.000,00
Fuente de poder		1	UN	\$ 35.000.000,00
Perno		1	UN	\$ 17.500,00
Prensa estopa		1	UN	\$ 40.000,00
Cable electrico		1	MT	\$ 50.000,00
Manguera		1	UN	\$ 65.000,00
Manguera libre de carbono		1	UN	\$ 3.800.000,00
Transformador		1	UN	\$ 2.500.000,00
Switch ON/OFF		1	UN	\$ 10.000,00
Sistema de refrigeracion		1	UN	\$ 23.259.000,00
Pinzas sujetadoras		1	UN	\$ 120.000,00
TOTAL				\$ 78.644.200,00

Fuente: elaboración propia.

Teniendo los materiales definidos se procede con la fabricación e instalación del horno por inducción, estos costos se contemplarán en la tabla 25.

Tabla 25. Costo mano de obra

Costo mano de obra para la fabricación de un horno por inducción			
Descripción	Cantidad	Unidades	Precio (COP)
Fabricacion de un horno por induccion	30	HORA	\$ 15.000.000,00
Instalacion del horno por induccion	3	DIA	\$ 9.000.000,00
TOTAL			\$ 24.000.000,00

Fuente: elaboración propia.

Con la información anterior se procede a totalizar los costos del diseño para su comparación contra una maquina en el mercado. Como se muestra en la tabla 26.

Tabla 26. Costo total del proyecto

Costo total del proyecto		
ITEM	DESCRIPCION	PRECIO (COP)
1	COSTO DE DESARRO DEL DISEÑO (TALENTO HUMANO)	\$ 10.950.000,00
2	COSTO DE MATERIA PRIMA DEL DISEÑO DE UN HORNO POR INDUCCION	\$ 78.644.200,00
3	COSTO MANO DE OBRA PARA LA FABRICACION DE UN HORNO POR INDUCCION	\$ 24.000.000,00
TOTAL		\$ 113.594.200,00

Fuente: elaboración propia.

7.2 PRECIO DE VENTA DE UN HORNO DE INDUCCION FABRICADO

Se realizó una cotización con una empresa especializada en la industria de los hornos de inducción, la cual indica el siguiente precio.

Tabla 27. Cotización Horno por inducción IEPF S.A.S

6. TERMINOS DE VENTA

6.1 PRECIO

6.1.1 Sistema de fusión Por Inducción IGBT. Referencia **5M PPT MINIMELT 10KW – 1x10KG** para fusión FERROSOS Y NO FERROSOS (Lo descrito en el ítem 4. Alcance y Suministro)

TOTAL EX WORKS 5M FACTORY.....USD 48.250

(CUARENTA Y OCHO MIL DOSCIENTOS CINCUENTA DOLARES AMERICANOS)



www.iepfsas.com
Tel: +57 1 5249190 Celular: +57 3175131275
sdiaz@iepfsas.com info@iepfsas.com
COLOMBIA – BOGOTA
FIB2018

Fuente: IEPF SAS. Cotización horno por inducción para fundición de cobre y sus aleaciones. [Citado: 23 de noviembre de 2018] Bogotá D.C.

8. ANÁLISIS AMBIENTAL

En la actualidad existe gran preocupación por el medio ambiente, debido a que en toda actividad industrial se presenta un impacto ambiental significativo, ya sea de alto medio o bajo impacto, por este motivo se busca que este proyecto tenga el menor impacto posible.

Para el análisis se tienen en cuenta que los hornos por inducción han mejorado en este aspecto en comparación con los hornos convencionales. Son más eficientes energéticamente, y producen mucho menos pérdida de materia prima que cualquier otro tipo de horno, prácticamente no emiten contaminantes a la atmósfera.

8.1 IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

Para el análisis ambiental es necesario establecer el impacto que va tener el proceso de fabricación y como tal el proceso de operación del horno por inducción, se realizó una comparación entre estas dos actividades como se observa en la tabla 28.

Tabla 28. Impactos ambientales

Factor ambiental	Impacto ambiental
Suelo	<ul style="list-style-type: none">• Posibles derrames• Afectación en la zona donde ira ubicado• Desechos sólidos de material de carga
Agua	<ul style="list-style-type: none">• Posibles derrames• Vertimientos en desagües• Desperdicios• Proceso de soldadura
Aire	<ul style="list-style-type: none">• Pintura en la fabricación• Gases a la atmósfera• Contaminación auditiva en fabricación• Contaminación auditiva en operación• Proceso de soldadura

Fuente: elaboración propia.

8.2 EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES

Para determinar el nivel de riesgo que produce el horno bien sea en la fabricación, o en la operación del mismo, se clasifican de la siguiente manera.

- 1 riesgo bajo.
- riesgo medio.
- 5 riesgo alto.
- N/A si no tiene riesgo.

De esta manera se determina el impacto que mayor afecta el ambiente como se puede observar en la tabla 29.

Tabla 29. Evaluación del impacto ambiental

Impacto ambiental	Proceso	
	Fabricación	Operación
Posibles derrames	1	5
Afectación en la zona donde ira ubicado	N/A	1
Desechos sólidos de material de carga	N/A	1
Posibles derrames	N/A	5
Vertimientos en desagües	3	1
Desperdicios	3	3
Proceso de soldadura	3	N/A
Pintura en la fabricación	3	N/A
Gases a la atmosfera	3	1
Contaminación auditiva en fabricación	N/A	N/A
Contaminación auditiva en operación	N/A	1
Proceso de soldadura	3	N/A
Total	19	18

Fuente: elaboración propia.

Al analizar los resultados obtenidos en la tabla 19, se determina que el proceso que genera mayor impacto ambiental es el de la fabricación del horno por inducción, teniendo en cuenta que este tipo de horno favorecen bastante al ambiente, para determinar qué tan agresivo es el proceso se evalúa tomando los siguientes indicadores.

- 0-12 = Bajo.
- 13-26 = Medio.
- 27-40 = Alto.

Establecidos los anteriores indicadores, se determina que la fabricación del horno por inducción tiene un nivel medio de riesgo, por este motivo se deben establecer alternativas para disminuir el impacto a la hora de su fabricación, como lo pueden ser el tipo de pintura a utilizar, la zona donde se realizaran los procesos de soldadura debe ser adecuada para no emitir contaminantes a la atmosfera.

9. CONCLUSIONES

- De acuerdo con los cálculos realizados en el diseño detallado del horno, se obtuvo una corriente primaria en la bobina inductora necesaria para fundir el material de carga, es considerablemente elevada, por tal motivo es necesario la implementación un sistema de refrigeración para evitar daños que puedan llegar a ocasionar la pérdida del total del equipo.
- El horno por inducción diseñado cumple con la función de fundir los materiales de carga seleccionados asegurando el campo electromagnético el cual es un factor determinante en este tipo de hornos.
- Mediante el estudio realizado y teniendo en cuenta las características diferenciadoras de los hornos por inducciones, se clasifican dentro de los tipos que menos emisiones de gases genera durante su proceso de fundición, convirtiéndolo en uno de los hornos más amigables para el medio ambiente.
- A nivel financiero el diseño desarrollado en este proyecto se realizó optimizando costos, materia prima, manufactura, entre otros, mediante la búsqueda de las mejores alternativas.

10.RECOMENDACIONES

- Teniendo en cuenta que el tiempo de fundición es de 40 minutos e incluyendo que se destinara para prácticas de laboratorio universitario, es recomendable un tiempo de operación más corto, debido a que las practicas serán más enriquecedoras para los estudiantes debido a que se podrían abarcar más actividades dentro de la franja de laboratorios.
- El diseño del horno fue realizado para fundir 2kg de cobre, latón y bronce, por lo que los parámetros de diseño del equipo fueron calculados en función a estos materiales, si se requiere fundir otro tipo de metal no ferroso se deberá rediseñar en función a los nuevos materiales que se deseen fundir.

BIBLIOGRAFIA

AMBRELL. “Acerca de inducción calentamiento”. [En línea]. [15 de febrero de 2018]. Disponible en: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/508263/Ambrell_PDFs/411-0169-16.pdf?t=1477689127410.

ARIAN. “Que son y cómo funcionan las termocuplas”. [En línea]. [10 de septiembre de 2006]. Disponible en: <http://www.arian.cl/downloads/nt-002.pdf>.

ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Segundo Volumen. Ohio. ASM International, 1990. 1328 p.

ASTIGARRAGA URQUIZA, Julio y AGUIRRE ORMAZA, José Luis. Hornos industriales de inducción. Primera edición. México: Mc Graw Hill, 1999. 12 p.

BAUCCIO, Michael. ASM Metal reference book. Tercera edición. United States of America: ASM International, 1993. 614 p.

CALLISTER, William D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Primera edición. Utah: Editorial reverté, S.A, 1985. 524 p.

CHAPMAN, S. J. Maquinas eléctricas. Tercera edición. Bogotá: Editorial McGraw-Hill, 1987. 702 p.

CHINA JIUCHEN. “Graphite Crucible and Graphite Mold”. [En línea]. [12 de septiembre de 2017]. Disponible en: <http://www.china-jiuchen.com/main.asp?pid=17&id=9>.

DRUSEIDT ELEKTROTECHNIK. “Cables refrigerados con agua”. [En línea]. [6 de noviembre de 2018]. Disponible en: https://www1.druseidt.de/spanisch/produkte/flexible_verbindungen/untermenue/e.html.

GIANCHINO, Joseph W. WEEKS, William. Técnica y práctica de la soldadura. Primera edición. Barcelona. Editorial reverte, 1997. 500 p.

GINZBURG, Vladimir B. Steel Rolling technology: theory and practice. Primera edición. Pennsylvania. Marcel Dekker Inc, 1999. 791 p.

GROOVER, Mikell P. Fundamento de manufactura moderna. Tercera edición. Ciudad de México. McGraw Hill/Interamericana editores, 2007. 1022 p.

INCROPERA, Frank P. Fundamentos de transferencia de calor. Cuarta edición. Naucalpan de Juárez. Pearson Educación, 1999. 886 p.

INDUCTOTHERM. "Guía de fundamentos de seguridad en la fundición por inducción que puede salvar su vida". [En línea]. [18 de enero de 2011]. Disponible en: <https://code.inductotherm.com/06%20Resources/Safety/M2573%20Rev%202.pdf>.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. ISBN 9789588585673 153 p.

JEFFUS, Larry. Soldadura: principios y aplicaciones. Quinta edición. Madrid. Editorial paraninfo, 2009. 944 p.

KHAN, Md. Nazoor. Principles of engineering physics 2. Primera edición. New York. Cambridge university press, 2016. 600 p.

LCARDABA. "Tabla de grosores AWG (American wire gauge)". [En línea]. [14 agosto de 2018]. Disponible en: <http://www.lcardaba.com/articles/awg.txt>.

NERUDA, Marek. Modelling of electrical resistivity for electrically conductive textile materials. Praga, 2014. P. 95p. Tesis. (Ph.D. Programme: Electrical Engineering and Information Technology). Czech Technical University in Prague. Faculty of Electrical Engineering.

ROSSITER, Paul L. The electrical resistivity of metals and alloys. Primera edición. New York. Cambridge university press, 1991. 456 p.


WORLD ACADEMY OF SCIENCE. "Design calculation and performance testing of heating coil in induction surface hardening machine". [En línea]. [6 de noviembre del 2008]. Disponible en: <https://waset.org/publications/13504/design-calculation-and-performance-testing-of-heating-coil-in-induction-surface-hardening-machine>

TP LABORATORIO QUÍMICO. "Pinza de crisol". [En línea]. [05 septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/materiales-e-instrumentos-de-un-laboratorio-quimico/pinza-de-crisol.html>

ROSSITER, Paul L. The electrical resistivity of metals and alloys. Primera edición. New York. Cambridge university press, 1991. 456 p.

ANEXOS

ANEXO A.
CATALOGO BOBINA INDUCTORA DE COBRE

	Cobre - Tubo Cu	Última actualización 22 de noviembre de 2018 CU007645
1 de 1		
<p>Si el producto mostrado no es exactamente el requerido por favor háganoslo saber mandandonos un mensaje</p> <p>Diámetro exterior : 10,4 mm Espesor de pared : 0,2 mm Diámetro interior : 10 mm Pureza : 99,9 % Temple : Estirado</p>		

Fuente: GOODFELLOW. Catalogo cobre tubo. [citado: 22 de noviembre de 2018].
Disponible en:
https://www.goodfellowusa.com/catalog/GFCat4J.php?ewd_token=a5blbbb3h3tQrg3XiE1eWvhkjkQ4C&n=A7a7W7M7jnULJ5dqzFFByRrPOoVNpz.

ANEXO B. SISTEMA DE REFRIGERACION TIPO CHILLER

Línea RLA | Chiller Industrial con condensación con aire

La línea de chillers industriales RLA fue desarrollada para satisfacer las aplicaciones que requieren una carga térmica más expresiva, generalmente seleccionada para los proyectos de centrales de agua fría. Su construcción robusta y durable es ideal para instalación afuera.



Modelo	Capacidad Nominal ¹⁾	Potencia en Régimen ²⁾	Capacidad Instalada	Dimensiones en milímetros			Bomba de Proceso		Tanque de Agua	Aire de Condensación	Diámetro de la Tubería	Peso
	kcal/h	kW	kW	Anch.	Largo	Alt.	m ³ /h	mca	Litros	m ³ /h	Proceso	kg
RLA-75	75.500	31,7	47,8	1.150	2.600	2.500	16,5	30	290	43.000	3"	1.100
RLA-100	98.000	44,0	55,6	1.150	2.600	2.500	28,0	30	290	43.000	3"	1.300
RLA-130	127.500	53,9	71,0	1.150	2.600	2.500	40,0	30	290	43.000	3"	1.500
RLA-170	163.000	65,2	84,4	1.150	3.160	2.480	40,0	30	290	86.000	3"	1.600
RLA-210	208.000	78,8	104,5	1.150	3.160	2.480	60,0	30	290	86.000	3"	1.700
RLA-260	258.500	99,7	136,9	2.500	2.400	2.720	70,0	30	420	86.000	4"	2.000
RLA-330	324.000	119,8	165,9	2.500	3.500	2.720	86,0	30	420	129.000	4"	2.500
RLA-400	404.500	149,8	202,9	2.500	3.500	2.720	103,0	30	420	129.000	4"	3.900
RLA-500	481.500	182,2	247,3	2.500	4.620	2.720	145,0	30	730	172.000	6"	4.400
RLA-620	622.000	224,6	305,5	2.500	5.730	2.720	148,0	30	730	215.000	6"	5.200

1. Todos los modelos de la línea RL tienen doble circuito independiente de enfriamiento.
 2. Capacidades frigoríficas válidas para agua fría saliendo a 10°C, regresando a 14°C y temperatura ambiente de 27°C.
 3. Potencia con el chiller operando al 100% de su capacidad con agua fría a 10°C.

Fuente: MECALOR. Chillers enfriamiento de procesos industriales. [citado: 15 de abril de 2008]. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/00076201037dfdc8ba35c>.

ANEXO C.
CARBON FREE HOSE PIPE

AIRTECH
ADVANCED MATERIALS GROUP
USA • Luxembourg • England • China

CORPORATE HEADQUARTERS
5700 Skylab Road
Huntington Beach, CA 92647
Phone: (714) 899-8100
Fax: (714) 899-8179
E-mail: airtech@airtechintl.com
www.airtechonline.com

Page 12
22 January 2009

DATA SHEET

AIRFLOW 65R
All-Purpose Vacuum Hose

Description:

Airflow 65R can be used as an autoclave or oven hose. The outer ply is silicone rubber that encases a flexible steel tube that prevents collapse and hose separation. The bell-shaped ferrule helps hose lacerations at fitting ends extending hose life.

Product Characteristics:

Maximum Recommended Use Temperature:	450°F (232°C)
Maximum Recommended Autoclave Pressure:	120 PSI (9 BARS)
Standard Size:	¼ in. male NPT end fittings Nominal hose I.D. - 3/8 in. (0.96 cm) Nominal hose O.D. - 3/4 in. (1.91 cm)
Standard Lengths:	3 ft. (0.92m) to 30 ft. (9.2m)
Color:	Green



CATALOG POSITION: **VAC VALVES AND HOSES**



As the conditions or methods of use, including storage, are beyond our control, Airtech International, Inc. does not assume any responsibility for the performance of this material for any particular use. The material is sold "as is". Airtech International, Inc. disclaims, and buyer waives, any and all implied warranties, including without limitation the implied warranties of merchantability and of fitness for particular use. The information contained herein represents typical properties and should not be used for specification purposes.

MORE THAN A MANUFACTURER...A TECHNICAL PARTNER!

Fuente: AIRTECH. Advanced materials group. [citado: 10 de agosto de 2010]. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/00076201037dfdc8ba35c>.

ANEXO D. TERMOCUPLA TIPO S

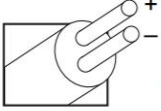
MAXIMUM TEMPERATURE RANGE
Thermocouple Grade
 32 to 2642°F
 0 to 1450°C

Extension Grade
 32 to 300°F
 0 to 150°C

LIMITS OF ERROR
 (whichever is greater)
Standard: 1.5°C or 0.25%
Special: 0.6°C or 0.1%


COMMENTS, BARE WIRE ENVIRONMENT:
 Oxidizing or Inert; Do Not Insert in Metal Tubes;
 Beware of Contamination; High Temperature

TEMPERATURE IN DEGREES °C
REFERENCE JUNCTION AT 0°C



Thermocouple Grade
NONE ESTABLISHED

Platinum-10% Rhodium
VS.
Platinum



Extension Grade

Revised Thermocouple Reference Tables

TYPE S

Reference Tables
 N.I.S.T.
 Monograph 175
 Revised to ITS-90

Thermoelectric Voltage in Millivolts

°C	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	°C	°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
40	-0.236	-0.232	-0.228	-0.224	-0.219	-0.215	-0.211	-0.207	-0.203	-0.199	-0.194	-40	550	4.732	4.742	4.752	4.762	4.772	4.782	4.793	4.803	4.813	4.823	4.833	550
30	-0.194	-0.190	-0.186	-0.181	-0.177	-0.173	-0.168	-0.164	-0.159	-0.155	-0.150	-30	560	4.833	4.843	4.853	4.863	4.873	4.883	4.893	4.904	4.914	4.924	4.934	560
20	-0.150	-0.146	-0.141	-0.136	-0.132	-0.127	-0.122	-0.117	-0.113	-0.108	-0.103	-20	570	4.934	4.944	4.954	4.964	4.974	4.984	4.995	5.005	5.015	5.025	5.035	570
10	-0.103	-0.098	-0.093	-0.088	-0.083	-0.078	-0.073	-0.068	-0.063	-0.058	-0.053	-10	580	5.035	5.045	5.055	5.066	5.076	5.086	5.096	5.106	5.116	5.127	5.137	580
0	-0.053	-0.048	-0.042	-0.037	-0.032	-0.027	-0.021	-0.016	-0.011	-0.005	0.000	0	590	5.137	5.147	5.157	5.167	5.178	5.188	5.198	5.208	5.218	5.228	5.239	590
0	0.000	0.005	0.011	0.016	0.022	0.027	0.033	0.038	0.044	0.050	0.055	0	600	5.239	5.249	5.259	5.269	5.280	5.290	5.300	5.310	5.320	5.331	5.341	600
10	0.055	0.061	0.067	0.072	0.078	0.084	0.090	0.095	0.101	0.107	0.113	10	610	5.341	5.351	5.361	5.372	5.382	5.392	5.402	5.413	5.423	5.433	5.443	610
20	0.113	0.119	0.125	0.131	0.137	0.143	0.149	0.155	0.161	0.167	0.173	20	620	5.443	5.454	5.464	5.474	5.485	5.495	5.505	5.515	5.526	5.536	5.546	620
30	0.173	0.179	0.185	0.191	0.197	0.204	0.210	0.216	0.222	0.229	0.235	30	630	5.546	5.557	5.567	5.577	5.588	5.598	5.608	5.618	5.629	5.639	5.649	630
40	0.235	0.241	0.248	0.254	0.260	0.267	0.273	0.280	0.286	0.292	0.299	40	640	5.649	5.660	5.670	5.680	5.691	5.701	5.712	5.722	5.732	5.743	5.753	640
50	0.299	0.305	0.312	0.319	0.325	0.332	0.338	0.345	0.352	0.358	0.365	50	650	5.753	5.763	5.774	5.784	5.794	5.805	5.815	5.826	5.836	5.846	5.857	650
60	0.365	0.372	0.378	0.385	0.392	0.399	0.405	0.412	0.419	0.426	0.433	60	660	5.857	5.867	5.878	5.888	5.898	5.909	5.919	5.930	5.940	5.950	5.961	660
70	0.433	0.440	0.446	0.453	0.460	0.467	0.474	0.481	0.488	0.495	0.502	70	670	5.961	5.971	5.982	5.992	6.003	6.013	6.024	6.034	6.044	6.055	6.065	670
80	0.502	0.509	0.516	0.523	0.530	0.537	0.544	0.551	0.558	0.565	0.572	80	680	6.065	6.076	6.086	6.097	6.107	6.118	6.129	6.139	6.149	6.160	6.170	680


Fuente: OMEGA. Maximum temperatura range. [citado: 24 de febrero de 2005].
 Disponible en: <https://mx.omega.com/temperature/Z/pdf/z208-209.pdf>.

ANEXO E.
FICHA TÉCNICA MANTA CERÁMICA

 <p>CALORCOL Expertos en Ingeniería de Aislamientos</p>	<h1>Ficha Técnica</h1> <h2>MANTA CERÁMICA</h2>
	<p>Soluciones de aislamiento</p>  <p>Térmica</p>
<p>Ha sido diseñado para proveer altos niveles de aislamiento térmico en ductos, tuberías, hornos, calderas y cuerpos cilíndricos que operan a altas temperaturas.</p>	<h3>Descripción</h3> <p>Manta de fibra cerámica con muy baja conductividad térmica, fabricada por procesos de soplado o centrifugado. Sin aglutinantes químicos, sus costuras le proporcionan excelente resistencia mecánica y gran facilidad de instalación.</p> <h3>Aplicaciones</h3> <ul style="list-style-type: none">■ Aislamiento, revestimiento y reparación general de hornos, calderas y otros equipos de alta temperatura.

Fuente: CALORCOL. Ficha técnica manta cerámica. [citado: 25 de julio de 2000]. Disponible en: <https://calorcol.com/calorcol/calorcolsite/wp-content/uploads/2014/01/productos-termica/mantaceramica.pdf>.

ANEXO F.
PINZAS SUJETADORAS

<p>TONGS CRUCIBLE HOLDER HANDLE FOR CRUCIBLE POURING HOLDER 13"</p> 	<p>DESCRIPTION:</p> <p>TONGS CRUCIBLE HOLDER / HANDLE - MELTING TONGS 13"</p> <p>Crucible tong is a plier type handle designed to hold a range of crucibles.</p> <p>APPLICATIONS:</p> <p>Handle is ideal for holding, moving or pouring molten metal.</p> <p>SPECIFICATIONS:</p> <ul style="list-style-type: none">• Overall Length: 13-1/2" - 340mm• Plier Handle Body Length: 5" - 130mm• Holding Diameter Capacity: 2" - 2-7/8"• Made of Round Stainless Steel: 1/4" - 6mm Diameter• Weight: 8oz
--	--

Fuente: JEST. Tongs crucible holder handler for crucible pouring holder 13" [citado: 25 de febrero de 2018]. Disponible en: <https://jetsinc.com/crucibles-casting-melting/melting-supplies/tongs-crucible-holder-handle-for-crucible-pouring-holder-13>.

ANEXO G. FUENTE DE PODER

TMF

High Power Induction Melter

Melting plants can be provided with one or more melting stations using a power switch to drive one station or the other.

Maintenance of the furnace is very easy and allows rapid changing of the crucible and the safety refractory shell.

Inert gas or gas-flame are foreseen to protect the melt from oxidation.

Touch screen display is provided for a fast and user-friendly interface.

A water cooling plant is needed to cool the induction heating coils and the power generator.



	TMF5	TMF7	TMF10	TMF12	TMF-10P
Crucible capacity	2,4 kg Brass	3,4 kg Brass	5,4 kg Brass	6,8 kg Brass	1 kg Steel <i>(for steel assay purpose)</i>
Power	5 kW	7 kW	10 kW	12 kW	10 kW
Max. temperature	1300 °C	1350 °C	1400 °C	1450 °C	1800 °C
Melting time	15 min.	15 min.	15 min.	20 min.	3 min.

	TMF10-R	TMF15-R	TMF25-R	TMF35-R	TMF45-R	TMF60-R	TMF100-R	TMF150-R	TMF200-R
Power	10 kW	15 kW	25 kW	35 kW	45 kW	60 kW	100 kW	150 kW	200 kW
Zirconia crucible	1 kg Pt	2 kg Pt	8 kg Pt	12 kg Pt	22 kg Pt	30 kg Pt	40 kg Pt	80 kg steel	120 kg steel
Max. temperature	2000 °C	2000 °C	2000 °C	2000 °C	2000 °C	2000 °C	2000 °C	2000 °C	2000 °C
Alumina crucible	2 kg steel	5 kg steel	10 kg steel	15 kg steel	25 kg steel	50 kg steel	60 kg steel	80 kg steel	120 kg steel
Max. temperature	1700 °C	1700 °C	1700 °C	1700 °C	1700 °C	1700 °C	1700 °C	1700 °C	1700 °C
SiC crucible	8 kg Brass	20 kg Brass	30 kg Brass	30 kg Brass	30 kg Brass	80 kg Brass	80 kg Brass	200 kg Brass	320 kg Brass
Max. temperature	1450 °C	1450 °C	1450 °C	1450 °C	1450 °C	1350 °C	1350 °C	1350 °C	1350 °C

Fuente: TOP CAST ENGINEERING. Catalogue [citado: 21 de enero de 2019].
Disponibile en: www.topcast.it.