

DISEÑO DE UN HORNO DE INDUCCIÓN PARA FUNDICIÓN DE ALUMINIO.

ESTEFANY JHOANNA SUAREZ INFANTE

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ
2019

DISEÑO DE UN HORNO DE INDUCCIÓN PARA FUNDICIÓN DE ALUMINIO.

ESTEFANY JHOANNA SUAREZ INFANTE

Proyecto integral de grado para optar al título de:
INGENIERO MECÁNICO

Director:
Oscar Chamarraví Guerra.
Ingeniero Metalúrgico.

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ
2019

Nota de aceptación:

Físico. Jairo Andrés Coral Campaña
Jurado1

Ing. Miguel Alfonso Morales Granados
Jurado 2

Bogotá D.C., agosto de 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente Institucional y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

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 del Programa de Ingeniería Mecánica

Ing. Carlos Mauricio Veloza Villamil

DEDICATORIA

Este Trabajo está dedicado primeramente a Dios y a mi Familia (Mi madre, Padre y mi Hermano) quienes estuvieron apoyándome y creyeron en mí para capacitarme y guiarme en todo momento y así lograr alcanzar mi título de ingeniera mecánica.

Segundo a todas mis amigos y docentes que durante este proceso aportaron su granito de arena para poder culminar con este primer paso que me guiara para conseguir un futuro mejor.

Estefany Jhoanna Suarez Infante.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. GENERALIDADES	16
1.1. GENERALIDADES DEL LABORATORIO DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS	16
1.2. PROCESO DE FUNDICIÓN EN LABORATORIOS	23
2. PARÁMETROS Y ALTERNATIVAS DE DISEÑO	36
2.1. PARÁMETROS DE DISEÑO	36
2.2. PLANTEAMIENTO ALTERNATIVAS DE DISEÑO	39
2.3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	43
3. DISEÑO DETALLADO	45
3.1. CRISOL	45
3.2. RECUBRIMIENTO CERAMICO	48
3.3. BOBINA INDUCTORA	49
3.4. FUENTE DE PODER	59
3.5. SISTEMA DE REFRIGERACION	60
3.6. BUSBAR	66
3.7. TRANSFERENCIA DE CALOR	67
4. SIMULACION TERMICA	74
4.1. ANALISIS TERMICO DEL CRISOL	74
4.2. ANALISIS TERMICO DEL RECUBRIMIENTO CERÁMICO DEL CRISOL	78
4.3. ANÁLISIS TÉRMICO DEL CEMENTO REFRACTARIO	80
5. MANUALES DEL EQUIPO	83
5.1. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE HORNO	83
5.2. MANUAL DE OPERACIÓN	91
5.3. MANUAL DE MANTENIMIENTO	96
6. GUÍA DE LABORATORIO	100
7. ANALISIS AMBIENTAL	106
7.1. IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES	106
7.2. EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL	108
8. EVALUACIÓN FINANCIERA	110
8.1. COSTO DEL DISEÑO DE UN HORNO POR INDUCCION, MATERIA PRIMA Y MANO DE OBRA PARA SU REALIZACION.	110
8.2. PRECIO DE VENTA DE UN HORNO DE INDUCCION FABRICADO	112
9. CONCLUSIONES	113

10. RECOMENDACIONES	114
BIBLIOGRAFIA	116
ANEXOS	118

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Horno de canal	18
Imagen 2. Horno sin núcleo	19
Imagen 3. Horno eléctrico de arco directo trifásico	20
Imagen 4. Horno eléctrico de arco indirecto	21
Imagen 5. Horno de resistencia	22
Imagen 6. Horno de calentamiento directo	22
Imagen 7. Horno de fusión por inducción Compact	24
Imagen 8. Horno de inducción eléctrico	25
Imagen 9. Componentes de un horno de inducción sin núcleo	25
Imagen 10. Sistemas de un horno de inducción	27
Imagen 11. Bobina de una espira	30
Imagen 12. Bobina de canal	31
Imagen 13. Bobina de canal curvada	31
Imagen 14. Bobina de oblea	32
Imagen 15. Bobina interior	32
Imagen 16. Bobina de placa concentradora	33
Imagen 17. Bobina y transportador	33
Imagen 18. Bobina de aguja	34
Imagen 19. Bobina helicoidal	34
Imagen 20. Dimensiones del laboratorio	37
Imagen 21. Operación de un sistema de calentamiento por inducción	38
Imagen 22. Horno basculante	39
Imagen 23. Alternativa uno	40
Imagen 24. Segunda alternativa de diseño	40
Imagen 25. Tercera alternativa de diseño	41
Imagen 26. Crisol seleccionado	46
Imagen 27. Dimensiones del crisol	47
Imagen 28. Recubrimiento cerámico crisol	48
Imagen 29. Revestimiento refractario	49
Imagen 30. Configuración bobina	53
Imagen 31. Frecuencia por rendimiento óptimo	54
Imagen 32. Tipo de frecuencias según capacidad de los hornos de inducción	56
Imagen 33. Fuente de poder	60
Imagen 34. conexión con el Chiller	65
Imagen 35. Manguera libre de carbono	66
Imagen 36. Conexiones Busbar	66
Imagen 37. Paredes del horno de inducción	67
Imagen 38. Crisol a la temperatura ambiente	75
Imagen 39. Calentamiento a 180 s de iniciar el proceso	76
Imagen 40. Calentamiento a 360 s de iniciar el proceso	76
Imagen 41. Calentamiento a 540 s de iniciar el proceso	77
Imagen 42. Calentamiento al finalizar el proceso	77

Imagen 43. Calentamiento de 0 a 900 segundo del cerámico	79
Imagen 44. Calentamiento de 0 a 900 segundo del Cemento	81
Imagen 45. Calentamiento al finalizar el proceso	82
Imagen 46. Acople interno del horno	84
Imagen 47. Acople de la tapa exterior	85
Imagen 48. Instalación malla de seguridad	86
Imagen 49. Acople tapa malla	87
Imagen 50. Ensamble platina pivote tapa	88
Imagen 51. Acople tapa superior	88
Imagen 52. Acople tapa superior	89
Imagen 53. Acople de la manija	89
Imagen 54. Conexión de la bobina con la fuente de poder	90
Imagen 55. Montaje mesa estructura	91
Imagen 56. Encendido del chiller	92
Imagen 57. Abertura de la tapa superior	92
Imagen 58. Extracción del crisol	93
Imagen 59. Panel principal de la fuente de poder	95
Imagen 60. Equipo de protección	99
Imagen 61. Cotización Horno por inducción IEPF S.A.S	112

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Proceso de carga en el crisol	94
Cuadro 2. Actividades de mantenimiento Correctivo	97

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades de los materiales	28
Tabla 2. Puntos de fusión	28
Tabla 3. Propiedades físicas del aluminio	38
Tabla 4. Puntuación facilidad operacional	41
Tabla 5. Puntuación seguridad operacional	42
Tabla 6. Puntuación de Mantenimiento	42
Tabla 7. Puntuación Rendimiento	43
Tabla 8. Matriz de ponderación.	43
Tabla 9. Dimensiones del crisol	47
Tabla 10. Calor global del aluminio	69
Tabla 11. Propiedades del crisol	74
Tabla 12. Propiedades del material Grafito	74
Tabla 13. Cargas del crisol	75
Tabla 14. Propiedades del Cerámico crisol	78
Tabla 15. Propiedades del Alúmina	78
Tabla 16 Cargas del cerámico	79
Tabla 17. Propiedades del cemento refractario	80
Tabla 18. Propiedades del Cemento Refractario	80
Tabla 19. Cargas del cemento refractario	80
Tabla 20. Factores de emisión de material particulado	106
Tabla 21. Niveles de ruido	107
Tabla 22. Daños ocasionado a través del proceso	108
Tabla 23. Evaluación del impacto ambiental	109
Tabla 24. Costo del desarrollo del horno	110
Tabla 25. Costo de materia prima del diseño de un horno por inducción	111
Tabla 26. Costo Mano de Obra	111
Tabla 27. Costo Total del Proyecto	112

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Catálogo de selección por volumen del crisol	118
Anexo B. Cerámico refractario para crisol	120
Anexo C. Tubo de selección para bobina	121
Anexo D. Mangueras de conexión	122
Anexo E. Concretos Refractarios	123
Anexo F. Cotización completa	124

RESUMEN

La fundación universidad de américa en busca de mejorar los laboratorios de ingeniería mecánica para que los estudiantes obtengan y afiancen los conocimientos teórico –prácticos, propone el tema de diseñar un horno de inducción para el laboratorio de tratamientos térmicos, debido a que en la actualidad no se dispone de un horno de fundición, la idea principal de implementarlo es para fortalecer y adquirir experiencia en el manejo, entendimiento de los distintos procesos que se le pueden realizar a los metales no ferrosos.

El diseño del horno inductor para fundición de materiales no ferrosos específicamente aluminio por calentamiento electromagnético. Haciendo uso de las leyes del electromagnetismo se diseñó la bobina inductora, 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. Mediante los cálculos del voltaje, la corriente, la potencia y la frecuencia requerida en el proceso, se seleccionaron los elementos eléctricos y electrónicos como: capacitores, reductores y variadores de frecuencia que conforman la fuente de poder.

Con base en los requerimientos de la Universidad surgen tres alternativas de diseño, que se evaluaron de forma cualitativa por medio de una matriz de ponderación para determinar como: se selecciona el crisol para el almacenamiento del aluminio, teniendo en cuenta su máxima capacidad, temperatura de operación, proceso de vertido, seguridad industrial en la manipulación del material y funcionalidad en la operación de extracción.

En consecuencia, para la temperatura requerida se realizaron cálculos de transferencia de calor que permitieron saber cómo ocurriría la transferencia de calor y cuál será la temperatura final en la superficie exterior del horno. Para confirmar que los cálculos fueran realizados correctamente, se realizó el análisis térmico para determinar que la temperatura final no presenta riesgo para los estudiantes o el operador de este equipo.

Se elaboró guías de prácticas de laboratorio, un manual de funcionamiento, mantenimiento y seguridad del horno de fundición de aluminio para el adecuado uso por parte de los estudiantes.

En la evaluación financiera se determinó que no hay viabilidad, por costos de construcción debido a que en Colombia no hay la tecnología adecuada para lograr el diseño propuesto de forma satisfactoria.

PALABRAS CLAVE: Aluminio, Bobina, Crisol, Inducción, Electromagnetismo.

INTRODUCCIÓN

El horno por inducción será un equipo que complementará la formación, aprendizaje y práctica de los estudiantes que aspiran convertirse en ingenieros, siendo apoyo para la consolidación de los conocimientos teórico-prácticos en las pruebas de fundición. Con este equipo la Universidad implementará el laboratorio de ingeniería mecánica generando calidad, desarrollo y reconocimiento de los Programas de Ingeniería.

Mediante las prácticas se afianzarán los conocimientos teóricos de una forma más didáctica en el estudiante. Las asignaturas que generan ese conocimiento teórico son 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 de inducción para fundición de aluminio”*.

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

- Analizar los aspectos que posee el diseño de un horno de inducción.
- Elaborar el diseño conceptual, planteamiento de alternativas de la fuente eléctrica.
- Realizar el diseño del horno de inducción.
- Simular térmicamente el horno.
- Elaborar los planos de un horno de inducción.
- Realizar el manual de montaje, ensamblaje y de mantenimiento.
- Elaborar la guía del procedimiento del equipo.
- Evaluar el impacto ambiental en la operación.
- Elaborar la evaluación financiera.

Durante el desarrollo de este proyecto se debe tener en cuenta que su capacidad debe ser de 3 kg, y se fundirá aluminio, para luego ser vertido a una temperatura máxima de 720°C, el equipo contará con un sistema semiautomático de control de temperatura, no se realizarán los componentes electrónicos de control, no se fabricará ni se realizará ningún prototipo, el sistema de carga y apertura del horno será manual, el diseño del horno se basará en las especificaciones dada por el director del proyecto.

En el primer capítulo se explica las generalidades, materiales, tipo de proceso en el laboratorio, los tipos de hornos por inducción existentes, las partes del horno y su funcionamiento.

El segundo capítulo habla de los parámetros y requerimientos para el diseño del horno; la ubicación, el espacio disponible en el laboratorio, tiempo de funcionamiento del horno, temperaturas y condiciones del aluminio; Se hace un planteamiento y seleccionó de alternativas de diseño basados en: la ubicación, el espacio disponible en el laboratorio, tiempo de funcionamiento del horno, temperaturas y las condiciones de punto cero.

En tercer capítulo es el diseño de la alternativa elegida en el capítulo anterior, mediante 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 cuarto capítulo es un análisis térmico que soporta los cálculos de transferencia de calor y permite observar el comportamiento de cada material refractario que conforma el horno de inducción.

El quinto capítulo está conformado por los manuales de operación ensamblaje y mantenimiento del horno de inducción, cada manual indica los pasos detallados que se deben seguir para el correcto funcionamiento del equipo.

El sexto capítulo es la guía de laboratorio en donde los estudiantes sabrán que deben realizar en esta práctica, las precauciones que deben tener, el funcionamiento básico del horno y contestan una serie de preguntas de los datos obtenidos en el laboratorio.

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

El octavo capítulo se realizó una tabla comparativa entre los costos del diseño y el costo de un horno ensamblado por la empresa IEPF SAS.

1.GENERALIDADES

El objetivo de este capítulo es mostrar el funcionamiento de los hornos de inducción, y el por qué se debe implementar para el laboratorio de tratamientos térmicos de la Universidad de América. Teniendo en cuenta el estado actual del laboratorio, generalidades, procesos y requerimientos del cliente.

1.1 GENERALIDADES DEL LABORATORIO DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS

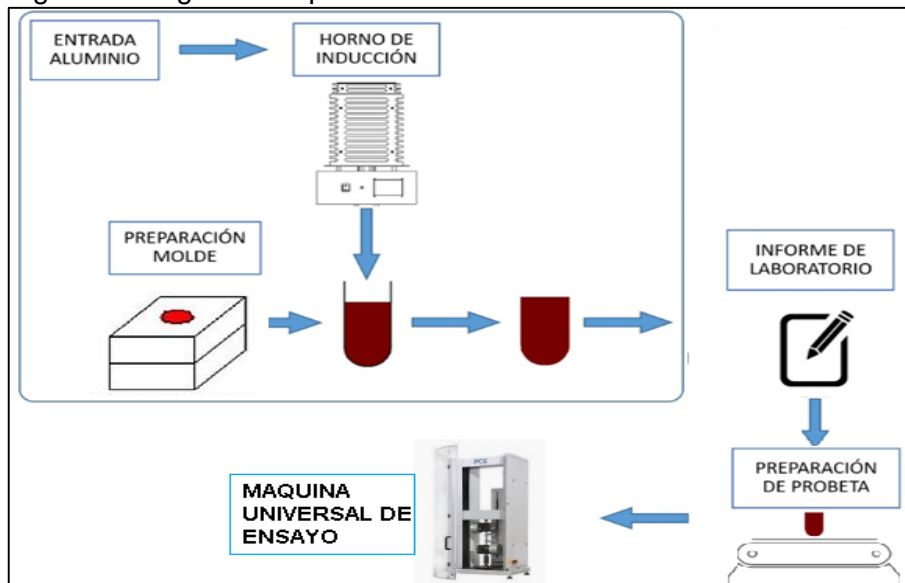
El departamento de Ingeniería Mecánica cuenta con un laboratorio de tratamientos térmicos, donde las asignaturas de procesos y tratamientos térmicos pueden hacer uso de los mecanismos instalados como, son: equipos para alistamiento de material de prueba, pulimiento de acabado tipo espejo, horno para temple y horno para revenido, donde se usan dos tipos de aceros (AISI SAE 1020 y AISI SAE 1040), en las practicas.

En consecuencia, no se hacen pruebas en materiales no ferrosos donde el interés se enfoca en un horno de inducción para fundir aluminio complementando en parte los estudios de materiales.

1.1.1 Muestras de ensayos actuales en el laboratorio. En el laboratorio de tratamientos térmicos se realizan procesos de: temple y revenido.

En la figura 1 se muestra un organigrama de proceso donde se observan lo que se está perdiendo al no implementar el horno de inducción en el laboratorio de la universidad.

Figura 1. Diagrama de procesos



Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta el diagrama de procesos, la probeta en estado sólido de aluminio se ubica al interior del horno de inducción para iniciar el proceso de fundición, una vez estando en estado líquido el material se vierte en un molde que tiene una forma determinada, al terminar el ciclo de enfriamiento, se debe realizar el alistamiento de la probeta, que consiste; en ligar y pulir, una cara de esta, para luego ingresarla al horno de tratamientos térmicos.

Al terminar el proceso del ensayo se debe generar el informe del laboratorio con el paso a paso realizado.

En la figura 1, se puede ver un cuadro que separa los procesos de fundición indicando que el laboratorio de tratamientos térmicos, no cuenta con estos actualmente, el proceso de preparación de molde, se puede considerar como un tema adicional a tratar para complementar los laboratorios de ingeniería mecánica.

Los hornos de inducción funcionan por medio de calentamiento por corrientes eléctricas que circulan a través de un solenoide generando un campo magnético que es transferido a un medio conductor dentro de un crisol¹.

1.1.2 Equipos del laboratorio de fundición por inducción. Existen dos tipos de hornos de inducción usados en laboratorios de metalurgia, estos hornos de inducción “han tenido desde 1950 un gran avance que continúan desplazando a otros procesos de desarrollo”, definidos por Julio Astigarraga², para realizar tratamientos térmicos y deformaciones plásticas.

1.1.2.1 Horno de inducción con núcleo/horno de canal: “su comportamiento es idéntico al de un transformador con el secundario formado por una espiral en corto circuito”³. “El canal pasa a través de un núcleo de acero laminado y alrededor del ensamble de la bobina. El circuito eléctrico formado por el núcleo y la bobina es completado cuando el canal es llenado con metal fundido”⁴, según la imagen 1 se visualiza la ubicación del canal y el inductor.

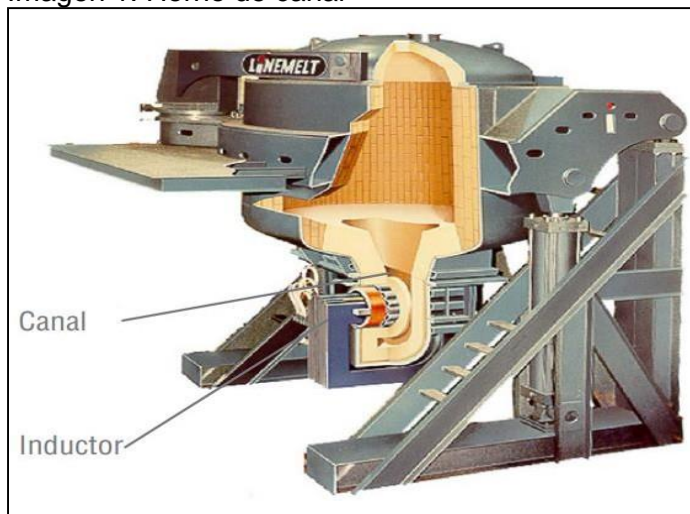
¹ DIAZ HERNÁNDEZ, Yusdel, MsC. Diseño del horno con vista a laminación continua de la palanquilla de acero. Repositorio Instituto superior politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, 2012.

² ASTIGARRAGA URQUIZA, Julio y AGUIRRE ORMANZA, José Luis. Hornos industriales de inducción. Primera edición. McGraw-Hill interamericana. España, 1999.

³ ASTIGARRAGA URQUIZA, Julio y AGUIRRE ORMANZA, José Luis. Hornos industriales de inducción. Primera edición. McGraw-Hill interamericana. España, 1999. P 3

⁴ INDUCTOTHERM Corp. Hornos de Inducción, Todos los derechos reservados. Boletín M2567. Estados Unidos, 2011. P 4

Imagen 1. Horno de canal

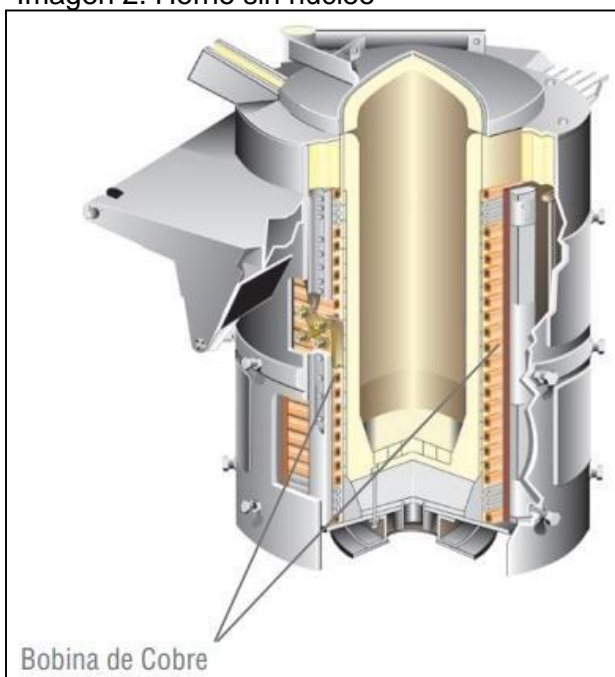


Fuente: INDUCTOTHERM.Corp. [consultado: 18 enero de 2019]. Disponible en: <https://code.inductotherm.com/06%20Resources/Safety/M2573%20Rev%202.pdf>

1.1.2.2 Hornos de inducción sin núcleo: “Un horno sin núcleo no tiene inductor, a diferencia de los hornos de canal. En su lugar, el baño entero funciona como el área de calentamiento de inducción. La bobina de cobre está cubierta por una capa de refractario en toda la longitud de la misma por la parte interna del horno”⁵, visualizando la imagen 2 encontramos la bobina que genera un campo magnético, el cual da lugar a corrientes inducidas al material colocado en su interior.

⁵ INDUCTOTHERM Corp. Hornos de Inducción, Todos los derechos reservados. Boletín M2567.Estados Unidos, 2011.P 4

Imagen 2. Horno sin núcleo



Fuente: INDUCTOTHERM.Corp. [consultado: 18 enero de 2019]. Disponible en:<https://code.inductotherm.com/06%20Resources/Safety/M2573%20Rev%202.pdf>.

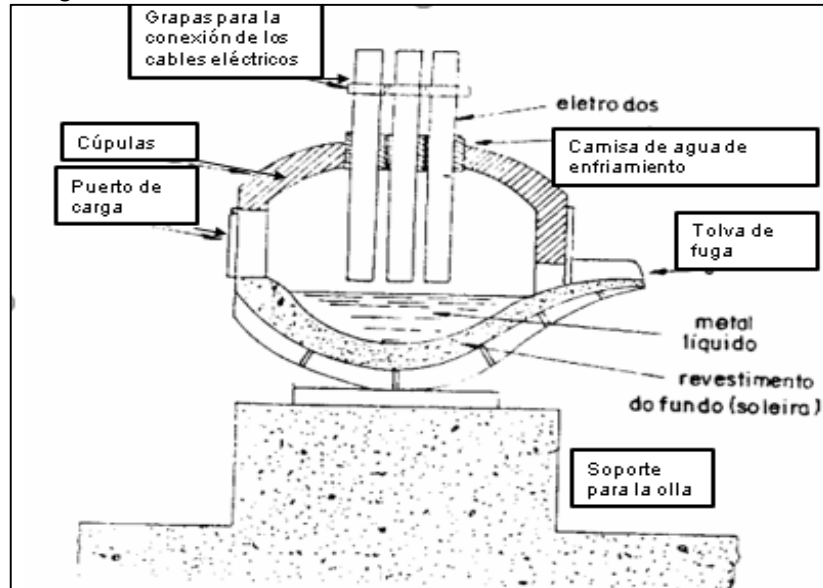
Se debe tener en cuenta que los mercados ofrecen otros tipos de hornos con desarrollo de procesos similares como horno de arco eléctrico y hornos de resistencia eléctrica.

- Hornos de arco eléctrico: Son equipos que funcionan a través de un arco eléctrico creado por una corriente que se transporta a través de un gas ionizado entre dos electrodos, sus aplicaciones industriales son para fundición de acero, latón, bronce y aleaciones de níquel. Los hornos de arco se clasifican en dos según Stella Ordoñez⁶.
- Hornos de calentamiento directo: Reciben este nombre debido a que el arco pasa directamente entre dos electrodos y el material a fundir, estos electrodos son de grafito para que soporten grandes temperaturas, estos hornos pueden manejar corriente monofásica cuando la capacidad de fundición es hasta 100 kg y trifásica para capacidades de 150 toneladas. En la imagen 3 encontramos los

⁶ ORDOÑEZ, Stella, Depto. de ingeniería Metalúrgica de la universidad de Chile. Técnicas Experimentales en Metalurgia. [citado: 10 de noviembre de 2018]. Disponible en: https://metalurgia.usach.cl/.../paginas/3._hornos_y_medicion_de_temperatura_-_stella_ordonez.pdf

componentes que permiten el proceso de fundición, como los electrodos, el puerto de carga, la cúpula, entre otros.

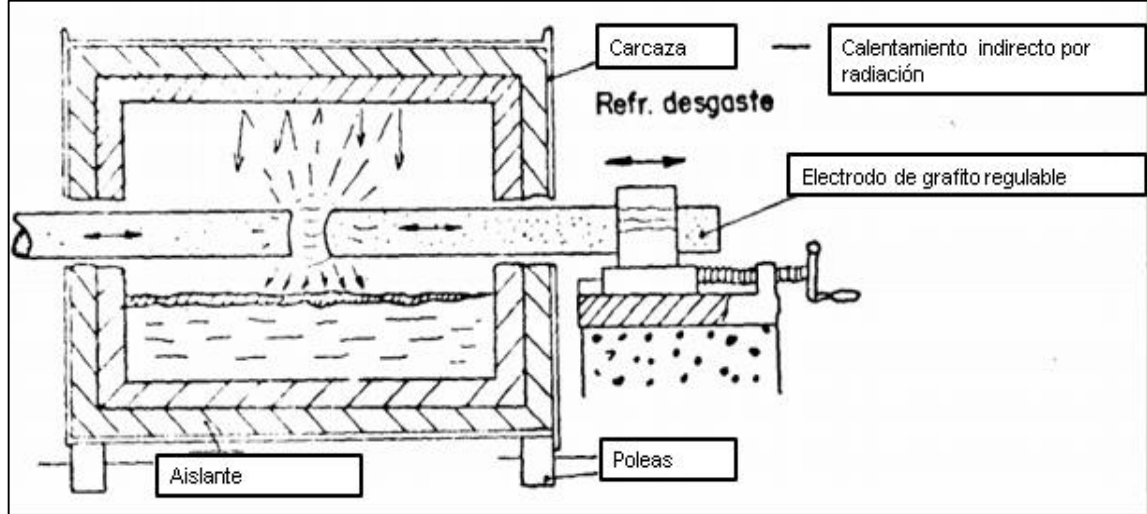
Imagen 3. Horno eléctrico de arco directo trifásico



Fuente: ORDOÑEZ Stella. Ingeniera metalúrgica de la universidad Santiago de Chile. Técnicas experimentales en metalúrgica, [consultado: 18 enero de 2019] Disponible en www.metalurgia.usach.cl/.../_hornos_y_medicion_de_temperatura_-_stella_ordonez.pdf

- Hornos de calentamiento indirecto: Funcionan con dos electrodos de carbono que se encuentran separados del material a fundir el material se calienta por radiación y son utilizados para fundir hierro y bronce cómo se visualiza en la imagen 4. Debido a sus esfuerzos de flexión y choques mecánicos a que están sujetos sus electrodos estos hornos tiene una capacidad limitada máxima de 2.000 kg

Imagen 4. Horno eléctrico de arco indirecto



Fuente: ORDOÑEZ Stella. Ingeniera metalúrgica de la universidad Santiago de Chile. Técnicas experimentales en metalúrgica, [consultado: 19 enero de 2019]. Disponible en www.metalurgia.usach.cl/.../_hornos_y_medicion_de_temperatura_-_stella_ordonez.pdf

- Los hornos de arco eléctrico tienen ventajas como, alta capacidad de fundición de metales, altas temperaturas de operación, su tamaño es relativamente menor a los tradicionales, no produce gases de combustión, ni polvos y sus costos de instalación son bajos a comparación de otros hornos. Las desventajas es que la mano de obra, o el personal que lo opera deben estar capacitado en el uso de los equipos para evitar accidentes.

Los hornos de resistencia. Son equipos utilizados para calentar las piezas colocadas en su interior por medio de transferencia de calor por radiación generada por su resistencia óhmica, generalmente sirve para materiales que posean un punto de fusión bajos, aunque algunos llegan a alcanzar temperaturas por encima de los 1.500 grados Celsius. En la imagen 5 se visualiza un horno de resistencia utilizado para fundición de materiales para joyería como oro y bronce.

- Los hornos de resistencia se clasifican en dos tipos: Hornos de calentamiento directo, consisten en pasarle la corriente directamente al material que se desea fundir es adecuado para piezas de metal de gran longitud y sección pequeña como garras, varillas, palanquillas y alambres.

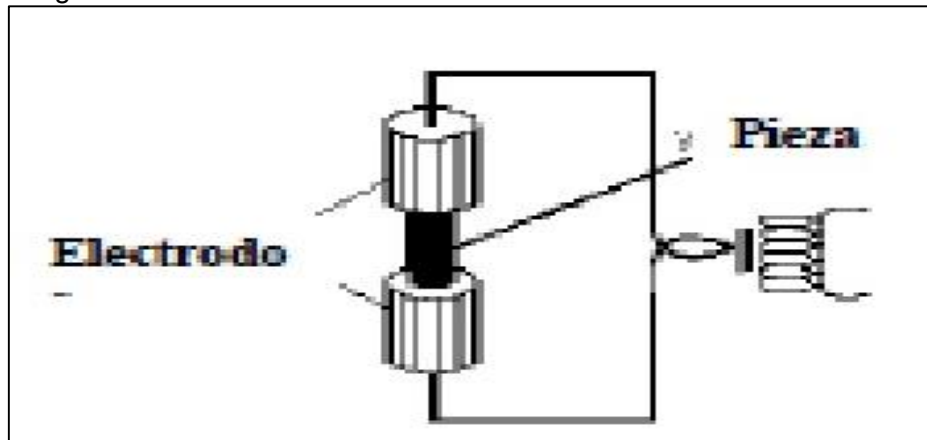
Imagen 5. Horno de resistencia



Fuente: ZHENGZHOU LANZHOU (2015) hornos de resistencia. [Consultado: 19 enero de 2019] Disponible en: <http://xurl.es/q/jlzd>

En la imagen 6 encontramos un diagrama eléctrico con dos electrodos que tienen contacto directo con la pieza, esta pieza genera una resistencia al paso de corriente, la misma resistencia de la pieza se convierte en calentamiento hasta el punto de fundirse.

Imagen 6 . Horno de calentamiento directo



Fuente: MARTÍNEZ Julio, [consultado: 20 enero de 2019] Disponible en: <https://image.slidesharecdn.com/hornoelectricosfame101210014024-phpapp02/95/horno-elctricos-fame-25-1024>

- Hornos de calentamiento indirecto, consiste en pasar la corriente a través de una resistencia independiente al material y el calentamiento se realiza por medio de la radiación generada por esta resistencia hacia el material.

Los hornos de resistencia son utilizados en la industria para la fundición de materiales no ferrosos, tratamientos térmicos para generar ciertas propiedades y

recubrimientos de piezas con otros materiales, tiene como ventaja que las concentraciones de gases de escape son muy bajas y los costos de mantenimiento son bajos, como desventaja su construcción es bastante difícil por la resistencia y necesita una potencia elevada para su funcionamiento.

1.2 PROCESO DE FUNDICIÓN EN LABORATORIOS

1.2.1. Preparación del horno de fundición por inducción. Los estudiantes deben realizar una revisión previa del equipo, verificando que no haya fugas ni daños en el sistema eléctrico; un alistamiento de la carga y los equipos auxiliares que se utilizan para el acondicionamiento del proceso, debe tener diferentes elementos de verificación y control. Deben contar con una supervisión del trabajo realizado en el aula, aplicando la norma de seguridad, cuidado del horno, normas de calidad, confiabilidad y cuidado del medio ambiente.

1.2.2. Operación del horno de inducción. El estudiante debe estar capacitado para operar el horno de manera segura teniendo en cuenta. “la preparación, control y puesta a punto del horno, la carga, fusión y control del material fundido y el proceso de colada, obteniendo productos con los requerimientos de calidad solicitados; realiza también el mantenimiento primario del horno. Aplica las normas de seguridad, higiene y cuidado del medio ambiente”⁷. En la imagen 7 se visualiza un horno de inducción para laboratorios de diseño modular para fundiciones de materiales preciosos como oro, plata y cobre.

⁷ EL MINISTERIO DE EDUCACIÓN. CFE N° 178/12-anexo XIX. (agosto,2012). Operador de horno a inducción para fusión de metales. Marco de referencia para la definición de ofertas de formación. Buenos Aires, Argentina, P2

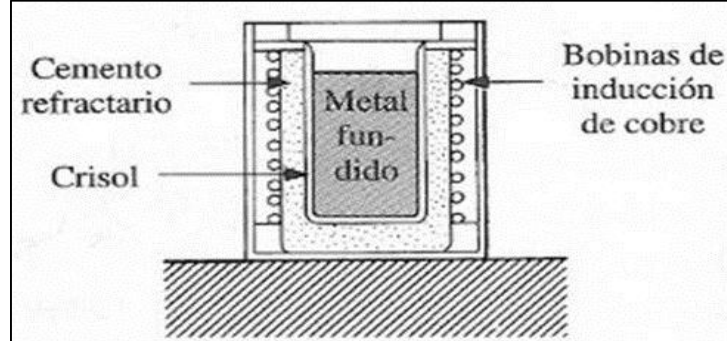
Imagen 7. Horno de fusión por inducción Compact



Fuente: INDUCCIÓN CO., LTD [consultado: 08 agosto de 2019]. Disponible en: <http://www.pwht-heat.com/info/>

El horno está constituido por una espiral cilíndrica tubular (enfriada por circulación interior de agua) de un material de sección cuadrada o circular, dentro de la cual se coloca un crisol que contiene el metal que se ha de fundir, en este caso será aluminio. Por efecto del campo magnético generado por la espiral se induce una corriente a la masa metálica y la energía eléctrica absorbida se transforma en calor. Los hornos de inducción de alta frecuencia poseen notables ventajas: su producción es de gran calidad con oxidaciones muy reducidas. En la imagen 8 se puede observar sus partes principales.

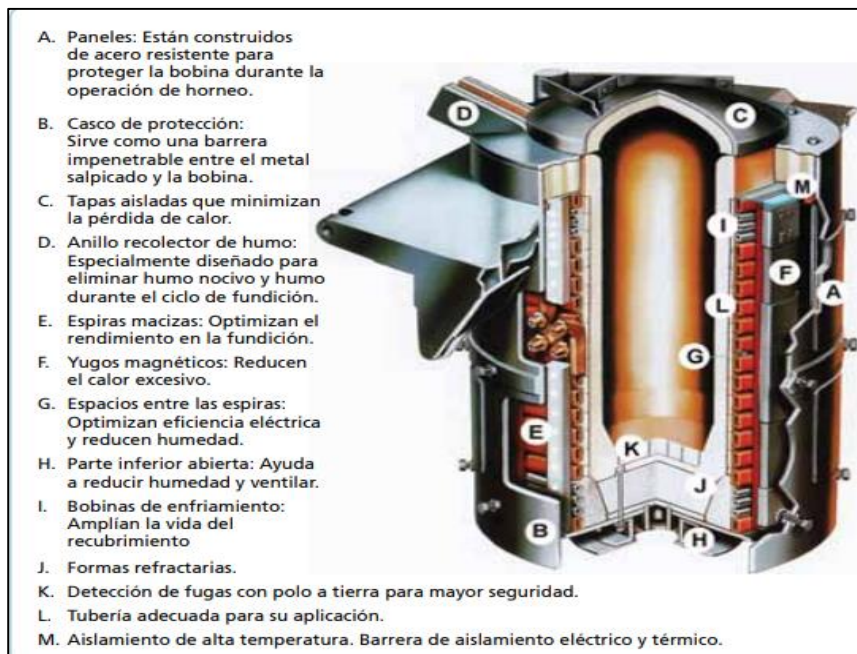
Imagen 8. Horno de inducción eléctrico



Fuente: CIFUENTES ECHEVERRY Catherine, 2011
 Disponible en: <https://tinyurl.com/yc dtk3dy>

La energía calorífica se logra por efecto de la corriente alterna y el campo electromagnético que generan corrientes secundarias en la carga; el crisol es cargado con material, en el horno el campo electromagnético penetra la carga y le induce la corriente que lo funde, una vez la carga esta fundida el campo y la corriente inducida agitan el metal, la agitación es producto de la frecuencia suministrada por la unidad de potencia, la geometría de la bobina, la densidad, la permeabilidad magnética y la resistencia del metal fundido. Esto se logra por los componentes internos del horno visualizados en la imagen 9, esta da una breve explicación de cada componente.

Imagen 9. Componentes de un horno de inducción sin núcleo



Fuente: BOTERO Federico, Inductotherm Corp., [citado:6 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://docplayer.es/309939-Hornos-de-induccion.html>

Conociendo las partes y el funcionamiento del horno de inducción el estudiante comprenderá mejor el proceso que se encuentra realizando en el laboratorio.

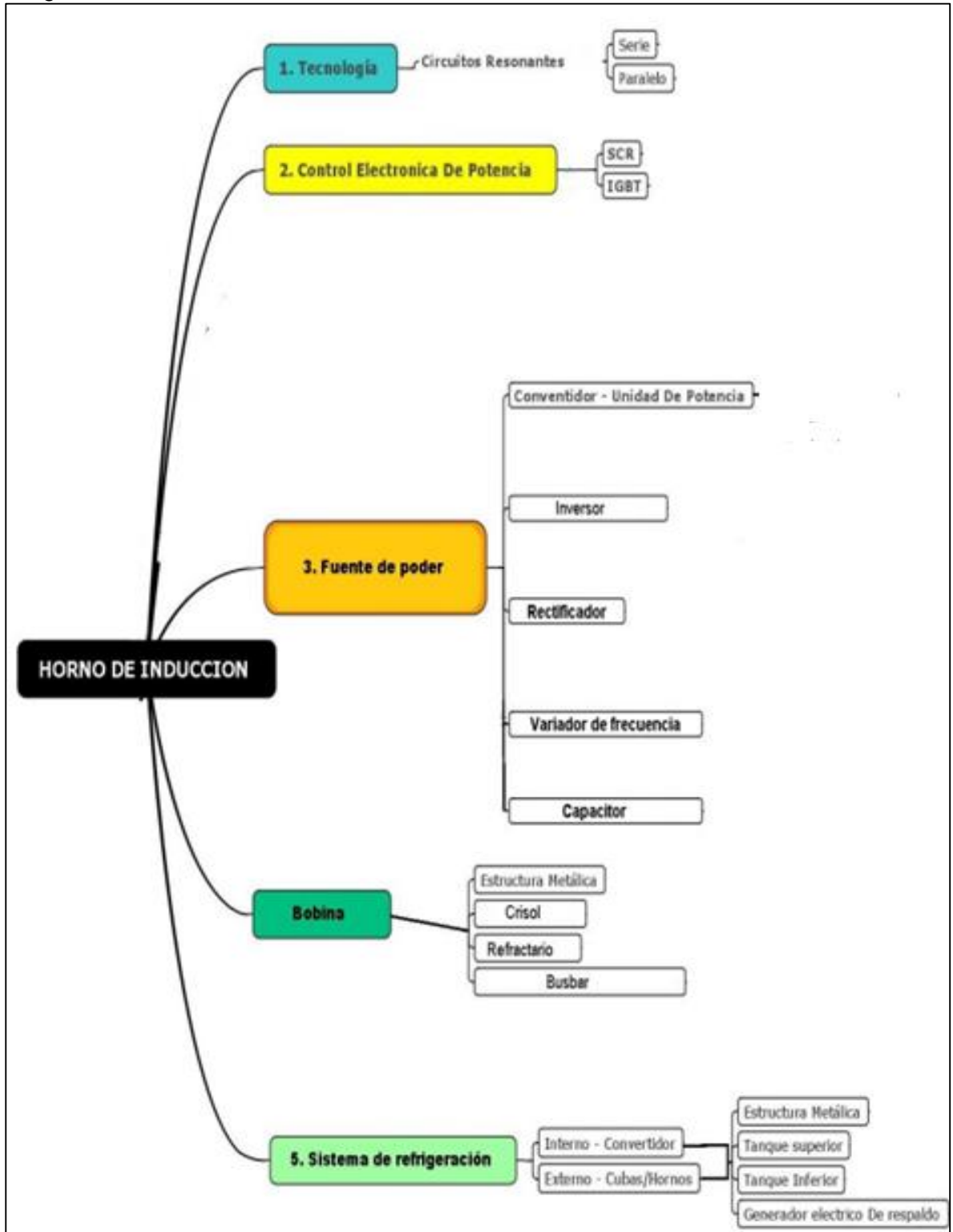
El estudiante realizara diferentes técnicas operativas para la fusión de metales de acuerdo a las especificaciones. En Colombia no existe una norma que especifique cuáles son esas funciones que el estudiante debe realizar. A diferencia de otros países como Argentina, que cuentan con una norma específica desde el ministerio de educación CFE N° 178/12-anexo XIX. (Agosto, 2012).Operador de horno a inducción para fusión de metales⁸. Establece que durante el proceso el estudiante debe: “Preparar hornos eléctricos por inducción para fusión de metales ferrosos y no ferrosos” y “Operar hornos eléctricos por inducción para la fusión de metales ferrosos y no ferrosos”.

En la imagen 10, creada por el empresario de ensamble Santiago Díaz, se logra identificar cada uno de los sistemas que posee un horno de inducción y las variables de operación.

Los subsistemas que conforman el horno se pueden apreciar en la imagen 10, 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.

⁸ EL MINISTERIO DE EDUCACIÓN. CFE N° 178/12-anexo XIX. (agosto,2012). Operador de horno a inducción para fusión de metales. Marco de referencia para la definición de ofertas de formación. Buenos Aires, Argentina.p3-8

Imagen 10 . Sistemas de un horno de inducción



Fuente: ENTREVISTA con Santiago Díaz IEPF. Empresario de ensamble. Bogotá, 20 de octubre de 2018.

1.2.3 Subsistema de carga. Propiedades y características de la carga. El subsistema de carga del horno está propuesto para el laboratorio de la universidad, donde el material de aluminio es ingresado de forma manual por el estudiante.

El principio básico de calentamiento por inducción tiene en cuenta las propiedades básicas del material de carga como: la resistividad eléctrica, la permeabilidad magnética, calor específico, conductividad térmica y emisividad. Hay que tener claro que estas propiedades varían según la temperatura: al aumentar, la resistividad eléctrica del metal aumentar. En la tabla 1 se observan los materiales más frecuentes en fundición para laboratorios.

Tabla 1. Propiedades de los materiales

Metal	Resistividad eléctrica. ρ 20°C ($\Omega \text{ xm}$)	Resistividad eléctrica. ρ fundido ($\Omega \text{ xm}$)	Calor específico a 1000°C (kJ/kgxK)	Conductividad térmica 400°C (W/mK)	Emisividad
Aluminio	$2.65 \cdot 10^{-8}$	$30 \cdot 10^{-8}$	1,081	249	0.3
Cobre	$1.72 \cdot 10^{-8}$	$20 \cdot 10^{-8}$	0.431	364	0.5
Níquel	$3.90 \cdot 10^{-8}$	$33 \cdot 10^{-8}$	0.528	59	0.5
Hierro	$9.71 \cdot 10^{-8}$	$120 \cdot 10^{-8}$	0.682	19	0.8

Fuente: elaboración propia, con base en: ASTIGARRAGA URQUIZA, Julio y AGUIRRE ORMANZA, José Luis. Hornos industriales de inducción. Primera edición. McGraw-Hill interamericana. España, 1995. P. 31-37.

Estos materiales de carga poseen los siguientes puntos de fusión.

Tabla 2. Puntos de fusión

Metal	Punto de fusión °C
Aluminio	660
Cobre	1,083
Níquel	1,455
Hierro	1,536

Fuente: elaboración propia, con base en: CASTAÑOS. Enrique. Los cambios de estado: Graficas de calentamiento y enfriamiento Bogotá, 18/07/2016 [consultado: 08 agosto de 2019]. Disponible en: <https://lidiakonlaquimica.wordpress.com/2016/07/18/>

Estos datos se utilizan para determinar las condiciones que el horno debe poseer al momento de trabajar con un material de carga ya que su punto de fusión es la temperatura que debe alcanzar el material para pasar de su estado sólido a un estado líquido, la resistividad eléctrica del material es lo que permite que las partículas del material vibren y esa fricción entre ellas genera el calentamiento.

Una de las ventajas más grande que posee la fundición por inducción es la disminución considerable de contaminación respecto al método de calentamiento por combustible, por esto la fundición por inducción genera grandes beneficios educativos a los estudiantes en el momento de las prácticas.

1.2.4 Fuente de alimentación. El suministro eléctrico, con el que cuenta actualmente el laboratorio de tratamientos térmicos de la universidad es de 220 Voltios. En la imagen 10, creada por el empresario de ensamble Santiago Díaz, se observa que el circuito eléctrico del horno se puede manejar con conexión en serie o paralela.

1.2.5 Fuente de poder. La fuente de poder es la parte encargada de suministrar la corriente necesaria y la frecuencia requerida en la bobina, para generar el calentamiento, entre sus componentes más importantes se encuentra el rectificador, que permite convertir la corriente alterna senoidal a corriente directa. El oscilador de frecuencia requiere de una alimentación de corriente directa con el fin de transformarla a corriente alterna incluyendo una alta variación de frecuencia, para lograr la aceleración de los electrones y así obtener el calentamiento requerido para la fundición del aluminio.

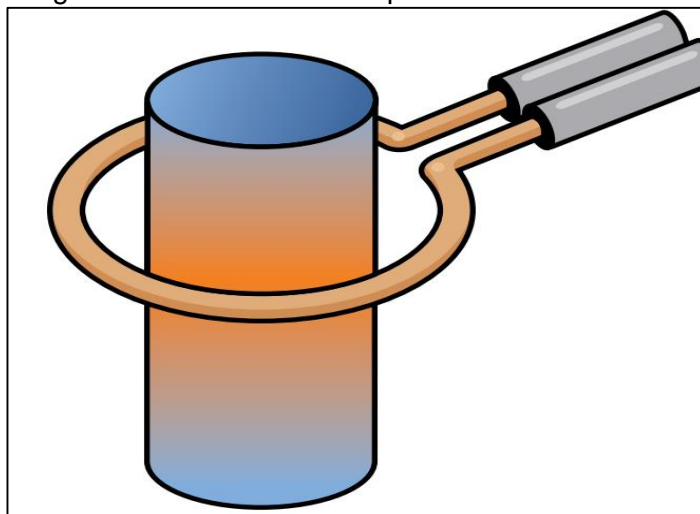
1.2.6 Subsistema de calentamiento. Este subsistema hace referencia a la bobina que es la encargada del calentamiento de la carga a través de la generación de un campo electromagnético; según la ley de Faraday, " el voltaje inducido es directamente proporcional a la velocidad con la que cambia el flujo magnético que atraviesa una superficie con el circuito como borde"⁹. La corriente circula por la bobina generando una inducción de corriente y, alta frecuencia hacia el material, para evitar un desgaste por calentamiento elevado del componente se cuenta con un perfil hueco para su refrigeración con agua re circulante.

⁹ FARADAY, Michael. Ley de Inducción Electromagnética de Faraday, citado por: CHAPMAN, S. J. Maquinas eléctricas. Quinta edición. Bogotá D.C: Editorial McGraw-Hill, 2012

Hay diferentes tipos de bobinas, estas varían según su tipo de aplicación en general no tiene una forma específica ya que cualquier conductor atravesado por una corriente alterna crea un campo magnético¹⁰ alterno. En la que se encuentran:

- Bobina de una espira: Son utilizadas “para calentar una franja estrecha de una pieza de trabajo o la punta de una pieza de trabajo. Estas bobinas también pueden barrer la longitud de una pieza de trabajo y se utilizan habitualmente para el tratamiento térmico. Con frecuencia, estas bobinas se ciñen a la pieza para proporcionar un patrón de calentamiento exacto.”¹¹ Como se puede visualizar en la imagen 11.

Imagen 11. Bobina de una espira



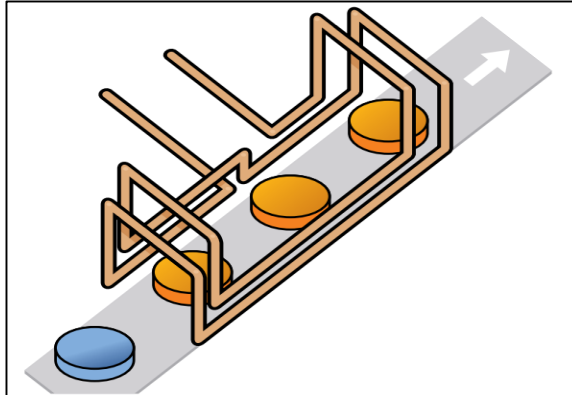
Fuente: AMBRELL, Induction heating solutions, [citado:6 de noviembre de 2018].
Disponible en: https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0168-16.pdf

- Bobina de canal. Si se observa la imagen 12, se visualiza que esta bobina está conformada de modo que la pieza de trabajo atraviese todo el campo electromagnético por acción de un mecanismo de transporte lineal; la pieza se calienta a medida que avanza por la bobina que puede configurarse para calentar toda la pieza o solo una pequeña parte.

¹⁰ Ambrell. (2018). https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0168-16.pdf. Recuperado el 18 de 09 de 2018, de <https://www.ambrell.com>: <https://www.ambrell.com>

¹¹Ambrell. (2018). https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0168-16.pdf. Recuperado el 18 de 09 de 2018, de <https://www.ambrell.com>: <https://www.ambrell.com> P2.

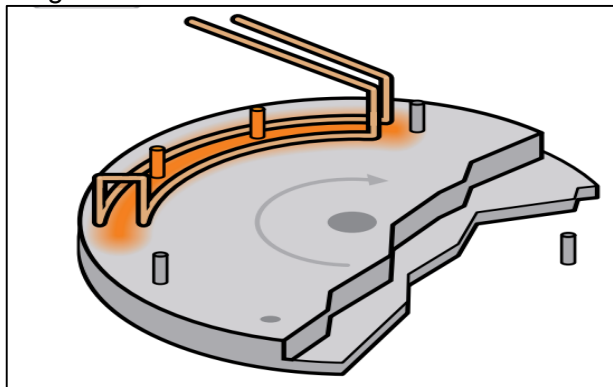
Imagen 12. Bobina de canal



Fuente: AMBRELL, Induction heating solutions, [citado:6 de noviembre de 2018]. Disponible en: https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0168-16.pdf

- Bobina de canal curvada. “Con frecuencia, las bobinas de canal están curvadas para adaptarse a una mesa giratoria como se puede observar en la imagen 13 y se configuran para ocupar uno de los pasos de un proceso de montaje de varios pasos”¹²

Imagen 13. Bobina de canal curvada

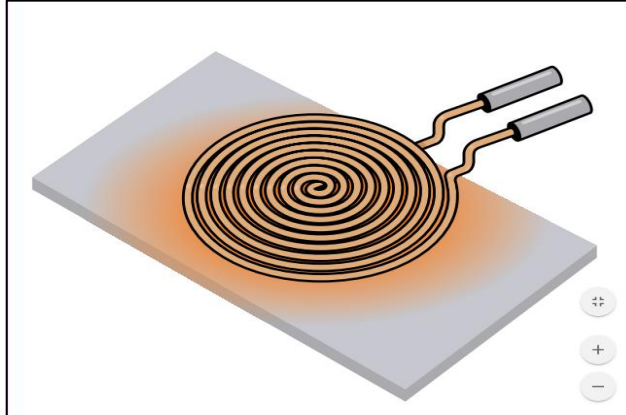


Fuente: AMBRELL, Induction heating solutions, [citado:6 de noviembre de 2018]. Disponible en: https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0168-16.pdf

- Bobina de oblea. Son utilizadas cuando es necesario calentar la pieza solo por un lado y no se necesita rodearla. Como se visualiza en la imagen 14.

¹² Ambrell. (2018). https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0168-16.pdf. Recuperado el 18 de 09 de 2018, de <https://www.ambrell.com>: <https://www.ambrell.com>. P3

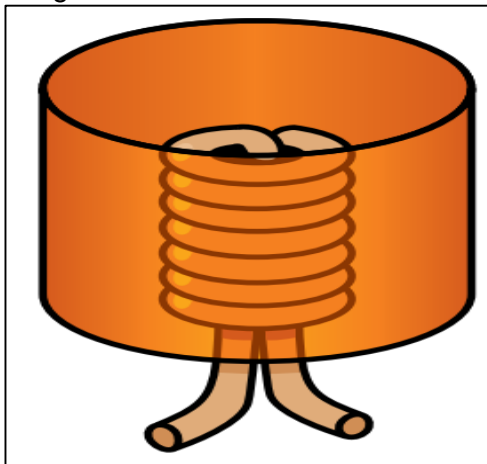
Imagen 14. Bobina de oblea



Fuente: AMBRELL, Induction heating solutions, [citado:6 de noviembre de 2018]. Disponible en: https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0168-16.pdf

- Bobina interior. Se usa para calentar cilindros y puede poseer una o varias espiras. La imagen 15 muestra cómo se introduce dentro del elemento cilíndrico

Imagen 15. Bobina interior

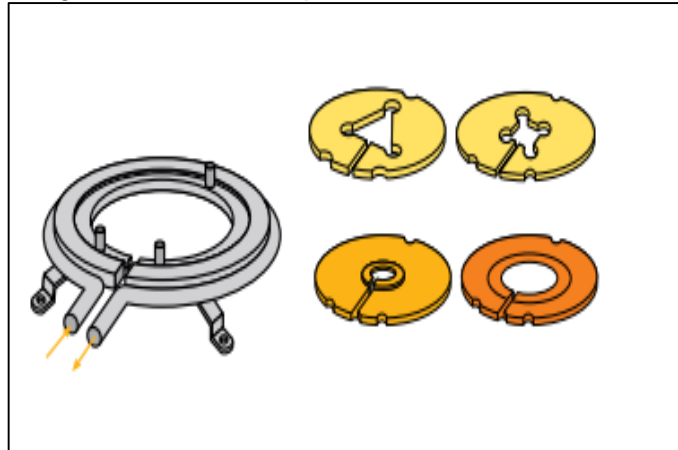


Fuente: AMBRELL, Induction heating solutions, [citado:6 de noviembre de 2018]. Disponible en: https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0168-16.pdf

- Bobina de placa concentradora. Se utilizan en las bobinas de una o varias espiras para concentrar la corriente de la bobina y producir un efecto de calentamiento definido en la pieza de trabajo. Estas bobinas también pueden

contar con una bobina maestra con insertos diseñada para calentar piezas con diferentes formas. Como se muestra en la imagen 16.

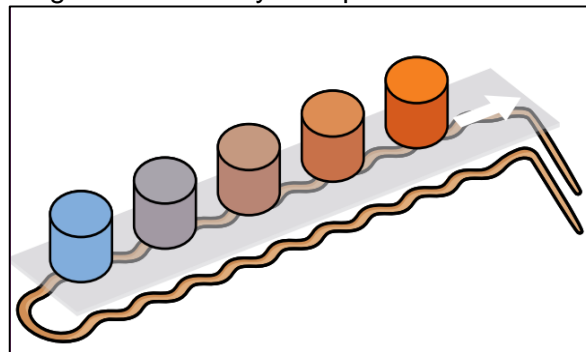
Imagen 16. Bobina de placa concentradora



Fuente: AMBRELL, Induction heating solutions, [citado:6 de noviembre de 2018].
Disponible en: https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0168-16.pdf

- Bobinas y transportadores. Muchas piezas se calientan mientras son transportadas por un sistema de transportado de color gris que se puede visualizar en la imagen 17, siempre y cuando el material del transportador no sea conductor de la electricidad, el campo magnético atraviesa el transportador y calienta la pieza de trabajo a medida que pasa por el campo.

Imagen 17. Bobina y transportador

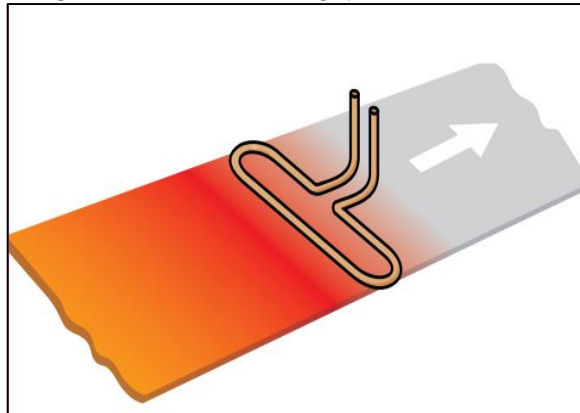


Fuente: AMBRELL, Induction heating solutions, [citado:6 de noviembre de 2018].
Disponible en: https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0168-16.pdf

- Bobina de aguja. “Se utiliza una bobina larga y delgada de una o varias espiras para calentar una zona larga y delgada de una pieza como se muestra en la

imagen 18, o bien se utiliza para calentar una banda móvil de acero delgado o aluminio”¹³.

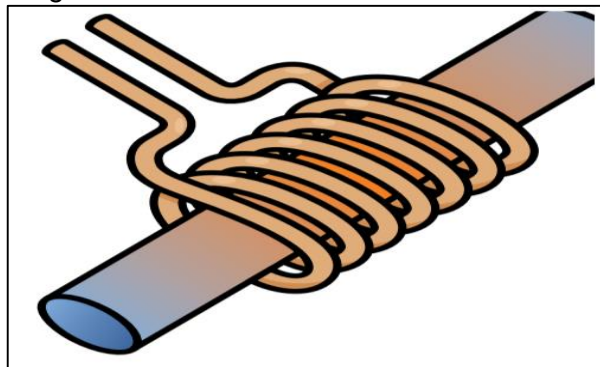
Imagen 18. Bobina de aguja



Fuente: AMBRELL, Induction heating solutions, [citado:6 de noviembre de 2018]. Disponible en: https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0168-16.pdf

- Bobina helicoidal o bobina solenoide. Es la más común y eficiente, el número de espiras define el patrón de calentamiento, la pieza de trabajo debe atravesar la bobina para calentarse en su totalidad uniformemente, lo que se conoce como calentamiento de barrido. Es la más utilizada en hornos de inducción para fundición, si se visualiza la imagen 19, se puede ver que el calentamiento es homogéneo en la pieza para fundir.

Imagen 19. Bobina helicoidal



Fuente: AMBRELL, Induction heating solutions, [citado:6 de noviembre de 2018]. Disponible en: https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0168-16.pdf

¹³ Ambrell. (2018). https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0168-16.pdf. Recuperado el 18 de 09 de 2018, de <https://www.ambrell.com>: <https://www.ambrell.com>. P3

1.2.7 Subsistema de descarga. Una vez fundido el aluminio el operario del horno debe retirar el crisol de forma manual a través de un instrumento especial que caza en la ranura superior del crisol en forma de pinzas, teniendo en cuenta todos los elementos de seguridad y las medidas necesarias que se requieran para cuidar su integridad física y la de sus compañeros ya que el crisol saldrá con una temperatura elevada, posteriormente se vierte el material fundido en el molde destinado para su estudio.

2. PARÁMETROS Y ALTERNATIVAS DE DISEÑO

Con el fin de complementar el laboratorio de tratamientos térmicos de la Universidad de América, se requiere diseñar un horno de inducción para fundición de aluminio. Por lo tanto, en el desarrollo de esta sección, se analizará tres propuestas de diseño las cuales se elaboran a partir de los requerimientos de la universidad. Una vez analizadas las propuestas se realizará la selección del diseño final mediante una matriz de ponderación.

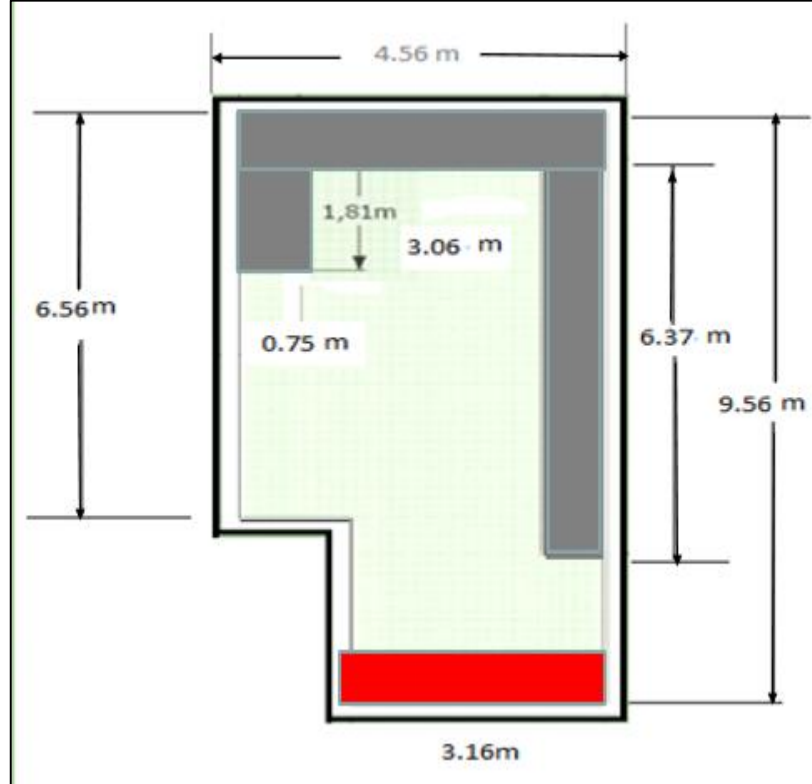
2.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

Los parámetros de diseño se han establecido mediante los requerimientos que se estipularon durante el desarrollo del horno por inducción, los siguientes requerimientos son indispensables para el uso del horno en el laboratorio de tratamientos térmicos:

- Ubicación
- Fuente de energía
- El material de carga es aluminio
- La capacidad máxima de carga es de 3 kg
- Tiempo de fundición del horno es de 15 minutos

2.1.1 Ubicación. El espacio que dispone la universidad para el montaje del horno por inducción en el laboratorio de tratamientos térmicos es una condición del diseño, en la imagen 20 se puede apreciar las dimensiones del laboratorio de tratamientos térmicos de la universidad América, el horno necesita de un espacio que se pueda delimitar para hacer seguro el descargo del material fundido al molde, sin equipos que obstruyan el paso generando accidentes.

Imagen 20. Dimensiones del laboratorio

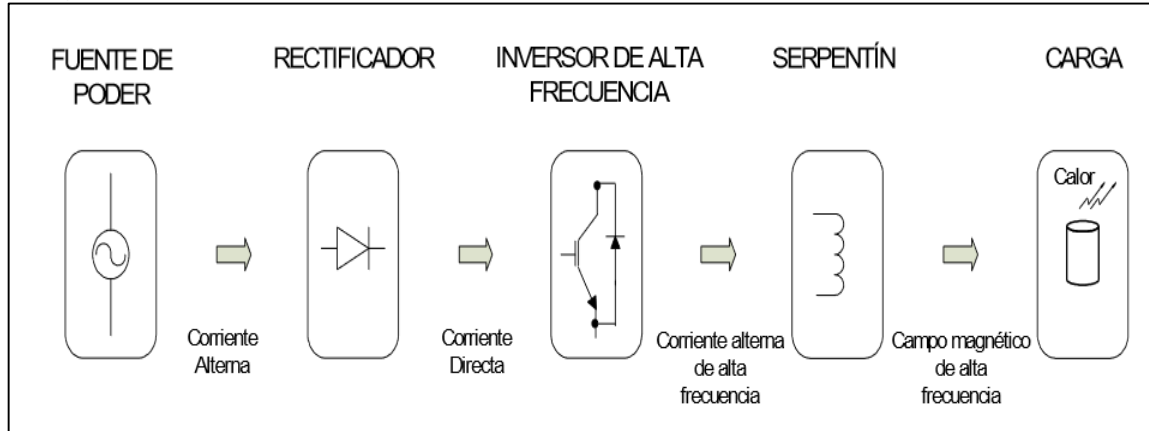


Fuente: elaboración propia

2.1.2 Fuente de energía. La fuente de energía con la que cuenta la universidad para este equipo es de 220 voltios. Para el correcto funcionamiento interno del horno se necesita: la fuente de poder, un rectificador que varía la magnitud de la tensión de salida¹⁴, el inversor de alta frecuencia: encargado de alimentarse de una fuente de tensión que le entrega una carga a una frecuencia próxima a la de resonancia. En la imagen 21 denominan serpentín a la bobina de inducción, en donde existe un efecto disipativo que está relacionado con los niveles de potencia adecuados, que pasará por la bobina generando el efecto disipador hacia el material.

¹⁴ ACEVEDO. Alfredo. Metodología para construcción de un horno de inducción electromagnético. Bucaramanga, noviembre 2007. [citado: 15 de febrero de 2018]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2007/125275.pdf>

Imagen 21. Operación de un sistema de calentamiento por inducción



Fuente: SEMICONDUCTOR COMPONENTS INDUSTRIES, LLC, [citado:2 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-9012.pdf>

2.1.3 Capacidad y propiedades del material de carga. El horno contará con una capacidad máxima de 3 kg de fundición de aluminio por solicitud de la universidad, lo que las propiedades del material se convierten en una especificación del diseño. En la tabla 3, se observan las principales características del aluminio puro el cual se manejarán en las prácticas del laboratorio.

Tabla 3. Propiedades físicas del aluminio

Propiedades del aluminio		
Propiedad	Valor	unidad
Punto de fusión (T fusión)	660	°C
Temperatura de vertido (Tf)	720	°C
Densidad (ρ)	2.698	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Permeabilidad magnética (μ)	1	H/m
Calor latente de fusión (Clf)	388	KJ/Kg
Calor específico (C)	880	J/Kg * °C
Resistividad eléctrica (ρ)	2,82*E-08''	Ω*m
Conductividad eléctrica (σ)	35.460.993	1/Ω*m
Masa (m)	3	Kg
Volumen (V)	0,0013	m ³

Fuente: elaboración propia

2.1.4 Tiempo del proceso. Debido a que las prácticas del laboratorio no son extensas se determina que el proceso de fundición se debe realizar en 15 minutos para que los estudiantes puedan continuar con el proceso y tengan el tiempo adecuado para su práctica ya que la disponibilidad del laboratorio es de solo 2 horas por grupo.

Los parámetros del diseño de la máquina serán enfocados para cumplir con todos los requerimientos anteriores.

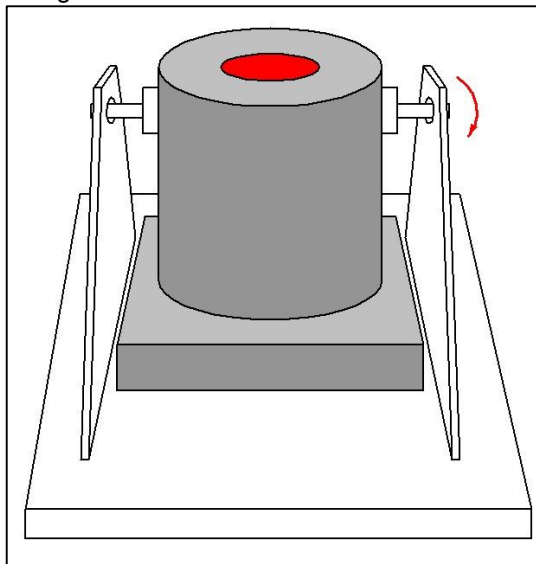
2.1.5 Fuente de energía. La fuente de energía con la que cuenta el laboratorio de la universidad para este equipo es de 220 voltios de corriente alterna monofásica a 60 Hz de frecuencia.

2.2 PLANTEAMIENTO ALTERNATIVAS DE DISEÑO

Para el diseño se plantearon tres alternativas de horno por inducción y a partir de una matriz de puntuación cualitativa se determinará qué equipo es más viable teniendo en cuenta que cumpla con las especificaciones requeridas, a continuación, se observan los modelos de las alternativas.

2.2.1 Alternativa uno. La primera alternativa está basada en un horno basculante visualizado en la imagen 22, “estos hornos movibles apoyados sobre un sistema de sustentación usualmente se les utiliza cuando es necesaria una producción relativamente grande de una aleación determinada. El metal es transferido a los moldes en una cuchara o un crisol precalentado, con la excepción de casos especiales en que es vaciado directamente”¹⁵.

Imagen 22. Horno basculante



Fuente: elaboración propia.

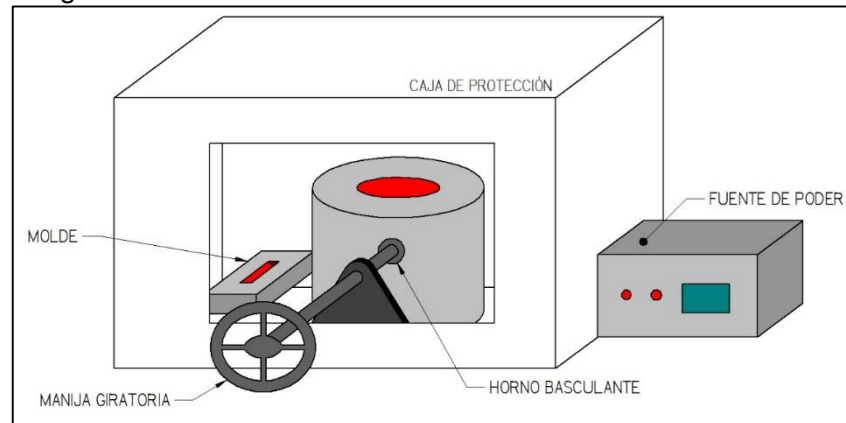
La idea principal consiste en que los estudiantes no corran ningún riesgo de quemaduras al usar este equipo, al mismo tiempo que puedan observar cómo se

¹⁵ PEREZ PINO Fredy y SOTO Enrique. Diseño, cálculo y construcción de un horno de fundición de aluminio tipo basculante y sus moldes. Universidad de Pamplona facultad de ingenierías y arquitectura departamento de ingeniería mecánica. Pamplona 2009

va transformando el material en estado sólido a líquido por el proceso de fundición por inducción.

En consecuencia, a la anterior preocupación se crea una idea, basada en el horno basculante, pero con una estructura de protección que lo encierre por completo, con una ventana que permita ver el proceso y unos controles externo para encenderlo, controlarlo y generar el vaciado en un molde, de forma segura desde el exterior de la estructura de protección. En la imagen 23, se puede observar cómo quedaría esta alternativa.

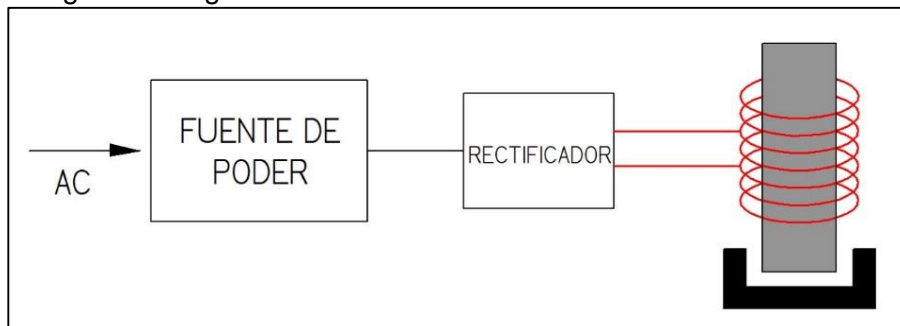
Imagen 23. Alternativa uno



Fuente: elaboración propia

2.2.2 Alternativa dos. La alternativa observada en la imagen 24, consiste en un horno de cajón donde se encuentra en su interior, todo el sistema eléctrico y de control, lo único expuesto es la bobina inductora a la que se le coloca un crisol con el material, esto permite al estudiante observar como el material se va fundiendo al transcurrir el tiempo. Al estar expuesto el estudiante debe estar a una distancia segura del equipo, en el momento de verter el material tener elementos de protección, unas pinzas de sujeción y mucho cuidado de no regar material en la bobina, ni tocarla por error.

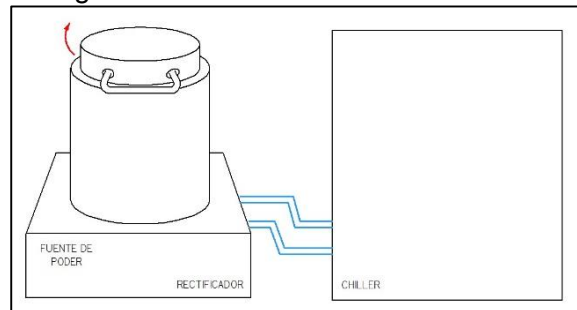
Imagen 24. Segunda alternativa de diseño



Fuente: elaboración propia.

2.2.3 Alternativa tres. La alternativa de la imagen 25 se busca mayor seguridad en el momento en el que se esté haciendo el proceso de fundición y una eficiencia en su calentamiento, cumpliendo con todos los requerimientos solicitados por el cliente. Este diseño consta de un crisol de grafito ubicado en el interior, rodeado por un cerámico, el cual ayuda aislar la temperatura que emite el material fundido, evitando que se dañe la bobina que rodea el cerámico. Posteriormente se ubica una pared de cemento refractario, encargado de aislar la temperatura, generando mayor seguridad en la operación, su parte inferior está conformada por el sistema eléctrico que permite el correcto funcionamiento del horno.

Imagen 25. Tercera alternativa de diseño



Fuente: elaboración propia

En este capítulo se realizó una matriz de ponderación, con el fin de definir entre las tres alternativas de diseño, para dar solución a los requerimientos de la universidad de América, nombrados en la sección 2.1. A continuación, se evalúa una serie de características principales que determinarán cual horno es la mejor opción para el laboratorio.

2.2.4 Facilidad operacional. El horno de inducción debe permitirle al estudiante manipularlo de forma sencilla, por lo que debe contar con un panel de control que permita encenderlo, ingresar los parámetros de trabajo, sea fácil de cargar y descargar el material. En la tabla 4, se evalúa si el criterio nombrado anteriormente debería ser manual: que todo lo realice el estudiante, desde controlar el tiempo, temperatura, hasta carga y descarga de material. Semiautomático: que el estudiante realice algunos criterios y otros lo realice el horno por sí solo. Automático: Que el horno realice todo el procedimiento, el estudiante solo deberá encenderlo.

Tabla 4. Puntuación facilidad operacional

Facilidad Operacional	Puntuación
Operación del horno / Manual	3
Operación del horno / Semiautomático	5
Operación del horno / Automático	10

Fuente: elaboración propia

Siendo 1 la peor calificación y 10 la mejor en los procesos de automatización del horno.

2.2.5 Seguridad de operación. El horno de inducción debe ser un equipo seguro para el estudiante, teniendo en cuenta la seguridad de cada proceso anteriormente nombrado. La tabla 5 evaluará, cada una de las alternativas como semiautomáticas, donde se activará una alarma sonora apenas el proceso acabe y el estudiante hará de forma manual la descarga del material. Se designa inseguro si el estudiante corre peligro de quemarse, paso de corriente o que el horno transmita radiación, con poco riesgo: si el estudiante solo posee riesgo a quemarse por contacto con el material fundido y seguro: si no hay posibilidades de accidente.

Tabla 5. Puntuación seguridad operacional

Seguridad de Operación	Puntuación
Inseguro	1
Poco Seguro	3
Seguro	4

Fuente: elaboración propia

Siendo 1 la peor calificación y 4 la mejor en el momento de brindar seguridad a la operación en el proceso de fundición del horno.

2.2.6 Mantenimiento. Este criterio se mide como complejo, moderado y fácil, según la dificultad que presenta el mantenimiento y el costo de cada alternativa, como se puede ver en la tabla 6, Siendo 1 la peor calificación y 4 la mejor en el momento de brindar el mantenimiento al horno.

Tabla 6. Puntuación de Mantenimiento

Seguridad de Operación	Puntuación
Fácil	1
Moderado	3
Complejo	4

Fuente: elaboración propia.

2.2.7 Rendimiento por tiempo de extracción. Este criterio se mide por tiempo de operación de extracción de la carga siendo mayor de 40 minutos malo, entre 16-30 minutos aceptable y entre 15 minutos o menos de 15 minutos un buen rendimiento. A este criterio evaluado en la tabla 7, se le da un rango de 1 a 5 siendo 1 la peor calificación y 5 la mejor.

Tabla 7. Puntuación Rendimiento

Seguridad de Operación	Puntuación
Más de 40 minutos	1
Entre 16-30 minutos	4
Menos de 15 minutos	5

Fuente: elaboración propia

2.3 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para el desarrollo de este capítulo se realiza una matriz de ponderación, con el fin de definir entre las tres alternativas de diseño para dar solución a los requerimientos de la universidad, expresados en la sección 2.1.

Tabla 8. Matriz de ponderación.

Criterios de Evaluación		Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
Facilidad Operacional	25%	Operación Manual control: Manual	3	0,8	Operación Manual Control semiautomático	3	0,8	Operación Manual Control semiautomático	5	1,3
Seguridad de operación	35%	Muy seguro	3	1,1	Poco seguro	1	0,4	Seguro	4	1,5
Mantenimiento	30%	Complejo	1	0,3	Fácil	5	1,5	Moderado	4	1,2
Rendimiento por tiempo de operación	10%	Menos de 15 minutos	4	0,4	15-30 minutos	4	0,4	Menos de 15 minutos	5	0,5
Total	100 %	Puntuación Total 1	2,5	Puntuación Total 2	3	Puntuación Total 3	4,4			

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la matriz de ponderación mostrada en la tabla anterior, se determina que la alternativa que mejor cumple con las condiciones de diseño de un horno por inducción es la tercera alternativa, en el que se basada el diseño final de este proyecto

Se descarta el horno basculante por varios criterios de diseño, este horno se utiliza industrialmente para manejar cargas mayores a 10 kg de material fundido, que por peso al operario se le dificulta extraer el crisol de forma manual, para hacer el vertimiento al molde, a causa de esto se genera los siguientes parámetros que no permiten su implementación:

2.3.1 Selección de crisol. El parámetro exigido por la universidad de 3 kg, es la base para hacer la selección del crisol, estos hornos requieren de un crisol fijo con

boquilla para hacer el vertimiento del material en un molde determinado, sin riego que pueda afectar la estructura del mismo, por consecuencia toca diseñarle una boquilla con cemento refractario que facilite el vaciado.

2.3.2 Dimensiones del horno. Las medidas de horno se riegan por el espacio del laboratorio de tratamientos térmicos, el horno está compuesto por una serie de elementos, como el crisol para la capacidad requerida, un cerámico de protección (este es opcional), la bobina inductora, su recubrimiento en cemento refractario y la carcasa. Adicional estos hornos cuentan con un sistema de soporte, con un eje que le permite realizar el movimiento, y un volante que genera la rotación, si a esto se le suma un cajón de protección que contenga el horno y se pueda ingresar el molde, ocupara un tamaño mucho mayor, en la imagen 20, se observa que no se dispone del espacio adecuando para la implementación de esta alternativa.

2.3.3 Mantenimiento. Para realizar el mantenimiento del equipo toca dejarle una compuerta de acceso, el eje necesita estar lubricado, el crisol debe ser limpiarlo para que no se acumule el material.”¹⁶ Este defecto aparece en una fundición que se solidifican antes de completar el llenado de la cavidad del molde. Las causales típicas son:” Fluidez insuficiente del metal fundido, muy baja temperatura de vaciado o el vaciado que se realiza muy lentamente. Esto generara más costos de mantenimiento.

¹⁶ PEREZ PINO Fredy y SOTO Enrique. Diseño, cálculo y construcción de un horno de fundición de aluminio tipo basculante y sus moldes. Universidad de pamplona facultad de ingenierías y arquitectura departamento de ingeniería mecánica. Pamplona 2009

3. DISEÑO DETALLADO

La finalidad de este capítulo es diseñar la alternativa seleccionada a través de la matriz de ponderación en la sección anterior. Para comenzar con los cálculos se debe tener en cuenta los requerimientos del cliente, como la capacidad máxima de fundición que es 3 kg de aluminio y el tiempo requerido para el proceso que es de 15 minutos.

3.1 CRISOL

Se selecciona el contenedor del material teniendo en cuenta que será el punto de partida, el crisol servirá como una base inicial para realizar los cálculos que se requieren en el diseño del horno, obteniendo el número de espiras, la longitud de calentamiento, dimensiones del cerámico y por último la carcasa del horno.

El material del crisol es de grafito-arcilla teniendo en cuenta que es uno de los materiales más usados en el proceso de fundición por inducción, siendo el carbón su principal componente, que en estado sólido presenta buenas propiedades refractarias, su conductividad eléctrica es relativamente baja, presenta propiedades antiadherentes y soporta temperaturas mayores a los 1.500°C

Para el horno por inducción que se está diseñando es necesario tener en cuenta que el crisol cuenta con una cuña donde se encaja las pinzas de manera fácil para sostenerlo, ágil y sobre todo segura para las personas que manipularán el horno. Por esta razón se calcula el volumen que ocupara los 3 kg de aluminio dentro del crisol.

Ecuación 1. Densidad

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

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

Donde;

ρ : Densidad del aluminio = 2.698,4 kg/m³

m: Masa (capacidad máxima del material) = 3 kg de aluminio

V: Volumen [m³]

De la ecuación 1 se despeja el volumen

$$V_{\text{aluminio}} = \frac{3 \text{ kg}}{2.698,4 \text{ kg/m}^3} = 0,0011 \text{ m}^3$$

Al volumen obtenido se le aplica un factor de seguridad, para evitar que al fundirse el material se riegue generando accidentes en el proceso, se utilizara un factor del 20 % adicional que nos permitirá tener la capacidad final que necesita contener el crisol. Se obtiene el 20% de los 3 kg de aluminio y se suman.

$$V_{aluminio} = \frac{3 \text{ kg} + 0.6 \text{ kg}}{2.698,4 \text{ kg/m}^3} = 0,0013 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta el resultado, se selecciona el crisol que mejor se adapte a esta capacidad se busca un catálogo que cumpla con una condición de diseño del crisol y es la cuña donde encajaran las pisas de sujeción, el tamaño se obtiene del cálculo de volumen que se encuentra en el catálogo en el anexo 1, como el volumen está en litros se convierte el volumen anterior de metros cúbicos a litros.

$$V_{crisol} = 0,0013 \text{ m}^3 * \frac{1.000 \text{ litros}}{1 \text{ m}^3} = 1,33 \text{ litros}$$

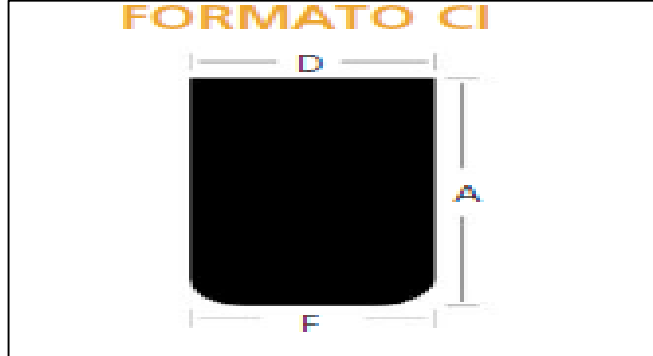
Una vez conocido el volumen del crisol, se procede a seleccionar, en el catálogo del fabricante, las dimensiones, capacidades y volumen del crisol, seleccionando el que mejor se adapta a los requerimientos. En la imagen 26 y 27 se puede observar el diseño del crisol y sus medidas sin anillo de sujeción.

Imagen 26 Crisol seleccionado



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>.

Imagen 27 Dimensiones del crisol



Fuente: SALAMANDER GRAFINOX. Candinhos de grafite -Argila [citado:2 de septiembre de 2018]
 Disponible en: www.morganmms.com

Tabla 9. Dimensiones del crisol

REFERENCIA	CAPACIDAD APROX.	ALTURA (mm)	DIAMETRO (mm)
	Vol.(L)		
CL 1 1/2	0,3	140	70
CL 2	0,45	155	94
CL 6	1,3	251	112,5
CL 15	2,2	256	153
CL 50	6,35	325	227

Fuente: SALAMANDER GRAFINOX. Candinhos de grafite-Argila [citado:2 de septiembre de 2018]. Disponible en: www.morganmms.com

Como se puede observar en la tabla 9, las dimensiones para un crisol de 1,3 litros son las siguientes:

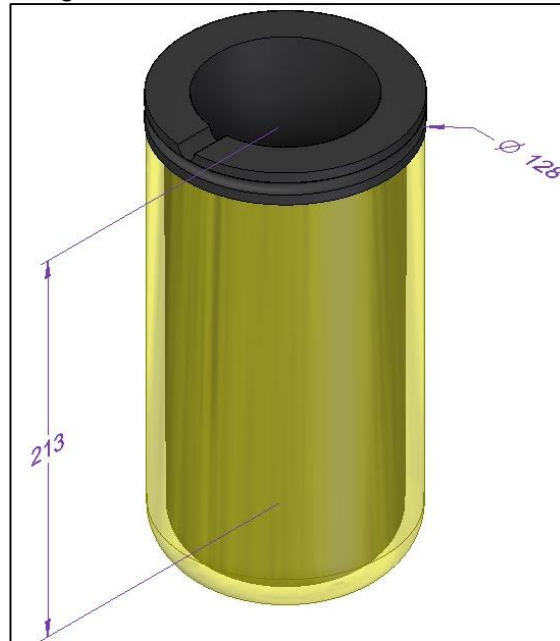
- Diámetro interno= 112,5 mm
- Diámetro exterior con anillo de sujeción= 130 mm
- Altura sin pestaña para sostener el crisol = 251 mm

Los datos anteriores se seleccionaron de un catálogo de crisoles con diferentes formas, nuestra selección es el formato CL debido a que posee las características de ser un crisol de extracción que se puede observar en el anexo 1. Existe varios proveedores de crisoles, se selecciona esta empresa ya que tiene la opción de realizar el crisol con las condiciones queridas por el cliente, manejan cerámicos especiales para cada crisol, y ofrecen garantía en caso de daños diferentes a los producidos por un mal uso.

3.2 RECUBRIMIENTO CERAMICO.

De acuerdo con el anexo 2 se hace una selección del recubrimiento cerámico con un diámetro interno de 128 mm y una altura de 213 mm como se muestra en la imagen 28 con el fin de proteger la bobina en caso de que haya derrame de material fundido.

Imagen 28. Recubrimiento cerámico crisol



Fuente: elaboración propia

En la imagen 29 se ve un ejemplo del crisol envuelto en el refractario, la asa del refractario debe ser calentado lentamente para remover la humedad y permitir los cambios cristalinos del cerámico, después del quemado en la cual la temperatura de revestimiento ha variado considerablemente, desde la cara caliente la cual está en contacto con el metal a la cara fría próxima a la bobina refrigerada, se crean tres zonas en el revestimiento, una zona sinterizada es formada en la cara caliente, con un relativo esfuerzo mecánico y una baja porosidad en su estructura. Esta zona es aproximadamente un quinto del espesor del revestimiento y en general está expuesta a la temperatura de fundición del material.

Imagen 29. Revestimiento refractario



Fuente: OCHOA MITE, federico.Prolongacion de la vida util del revestimiento refractario [citado:6 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/123456789/4443>

El revestimiento cuenta con unas zonas para generar mayor protección a la bobina, la zona de fritada se forma detrás de la cara sinterizada y está expuesta a una temperatura menor a la zona anterior, el desarrollo de esta genera esfuerzos mecánicos y ocupa un tercio de la zona de sinterizado y su porosidad es elevada. La zona cerca a la bobina es el remanente del refractario y su temperatura es muy mínima, es importante porque sirve como una protección de la bobina cuando se producen fracturas en la zona sinterizada¹⁷.

3.3 BOBINA INDUCTORA

En el horno de inducción la función primaria la hace la bobina del horno y el secundario la carga que en este caso es de 3 kg de aluminio.

Para el transformador ideal, se asume que las pérdidas son despreciables, por lo que la potencia de entrada es igual a la salida, entonces se determina que la energía necesaria para calentar el aluminio hasta la temperatura de vertido. La temperatura ambiental se puede considerar de 20 grados Celsius.

¹⁷Ochoa Mite federico.Prolongacion de la vida util del revestimiento refractario <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/123456789/4443>

Ecuación 2. Calor específico.

$$J = Ca * m * (Tf - Ti)^{18}$$

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

Donde;

Ca= Calor específico del aluminio= 0,896 J/g°C

m= 3 kg de aluminio en gramos= 3.000 g

Tf= Temperatura de vertido del aluminio= 720°C

Ti= Temperatura ambiente = 20°C

$$J = 3.000 \text{ g} * 0,896 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}} * (720 - 20)^\circ\text{C} = 1.881.600 \text{ J}$$

De la ecuación 2 se obtiene la energía necesaria para fundir los 3 kg de aluminio, pero se necesita hallar la potencia expresada en vatios, conociendo el tiempo se trabaja con la siguiente ecuación.

$$P = \frac{J}{t}$$

Donde

P =Potencia

J = Energía en Jouls

t= Tiempo en el que se debe fundir el aluminio

$$P = \frac{1.881.600 \text{ J}}{900 \text{ s}} = 2.090,66 \text{ W}$$

Como el funcionamiento de los hornos de inducción son similares a los de un transformado, se determinó que la potencia de salida es igual a la potencia de entrada, según Chapman¹⁹ la potencia es igual a:

$$P = V_t * I \text{ (W)}$$

Donde:

¹⁸ CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. Tercera edición. Ciudad de México. McGraw Hill/Interamericana editores, 2007. p. 148

¹⁹ CHAPMAN, S. J. (S.F.). Campo Magnético. En S. J. Chapman, Máquinas eléctricas (pág. 8). Bogota: MC Graw Hill.

P =Potencia

V_t =Voltaje

I = Corriente

Se obtiene que:

$$V_{t\text{entrada}} * I_{\text{entrada}} = 2.090,66 W$$

Sabiendo que el voltaje de entrada se obtiene de la fuente eléctrica que es igual a 220 V, la corriente se obtiene de:

$$P = V_{t\text{entrada}} * I_{\text{entrada}}$$

$$I_{\text{entrada}} = \frac{2.090,66 W}{220 V} = 9,5 A$$

Teniendo en cuenta que la bobina tiene una relación proporcional entre el voltaje, la corriente y su relación de espira, es decir:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_{t\text{entrada}}}{V_s} = \frac{I_{\text{entrada}}}{I_p}$$

Donde:

N_p = # de vueltas del transformador primario

N_s = # de vueltas del transformador secundario

I_{entrada} = Corriente entrada

I_s = Corriente de salida

$V_{t\text{entrada}}$ = Voltaje de entrada

Como no se conoce la totalidad de los datos, para poder determinar el número de vueltas se toma como condición que el número total de espiras de la bobina de cobre no debe sobrepasar la longitud disponible, la cual es de 71,3 mm, y un diámetro nominal del alambre de 8 mm, por lo tanto, utilizando la ecuación 3:

Ecuación 3. Numero de espiras

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

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

$$\# \text{ total de espiras} = \frac{71,3 \text{ mm}}{8 \text{ mm}} = 9$$

Teniendo el número de vuelta y conociendo que por propiedades de un óptimo rendimiento la bobina debe cubrir todo el material que se desea fundir, se toma la misma altura del cerámico y un diámetro interno de 130 mm para la bobina. Conociendo que la bobina es un solenoide de cobre que se calienta en el proceso se debe refrigerar, lo que permite incrementar las corrientes en el circuito. Por este motivo se usa un tubo de cobre que permita el paso de fluido en su interior, para determinar el diámetro óptimo de diseño se debe considerar la ecuación 4:

Ecuación 4: Longitud de un solenoide.

$$lb = N(\pi * D) [m]^{20}$$

Fuente: 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

Donde:

lb = longitud de la bobina en m

N = # de vueltas de la bobina

D = diámetro del hilo

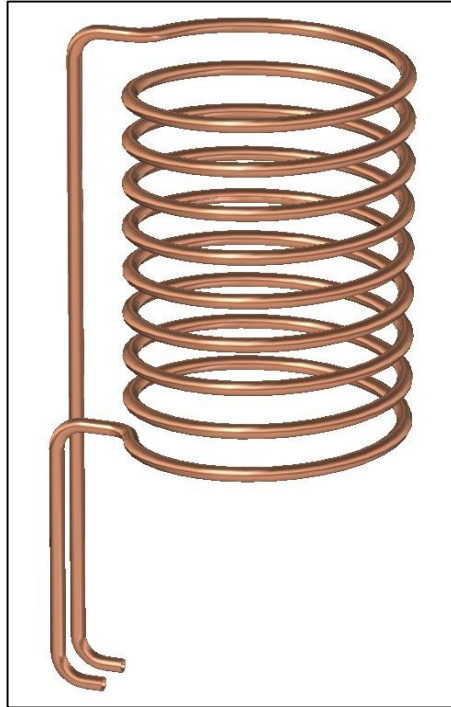
De la ecuación anterior se despeja el diámetro del hilo, por ser la bobina tubular el resultado se tomará como el diámetro externo. Reemplazando los datos conocidos se obtiene:

$$D = \frac{0.213 \text{ m}}{(\pi * 9)} = 0.007533 \text{ m}$$

Se convierte de metros a milímetros para hacer la selección del tubo para bobinado en el anexo 3, obteniendo 7.5 mm, en tabla normalizada comercial se elige el diámetro mayor por lo que se escoge un tubo de diámetro exterior de 5/16 de pulgada. Como se puede observar en la imagen 30 la bobina tendrá 9 espiras, generadas por el enrollamiento del tubo de cobre que se seleccionó.

²⁰ 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

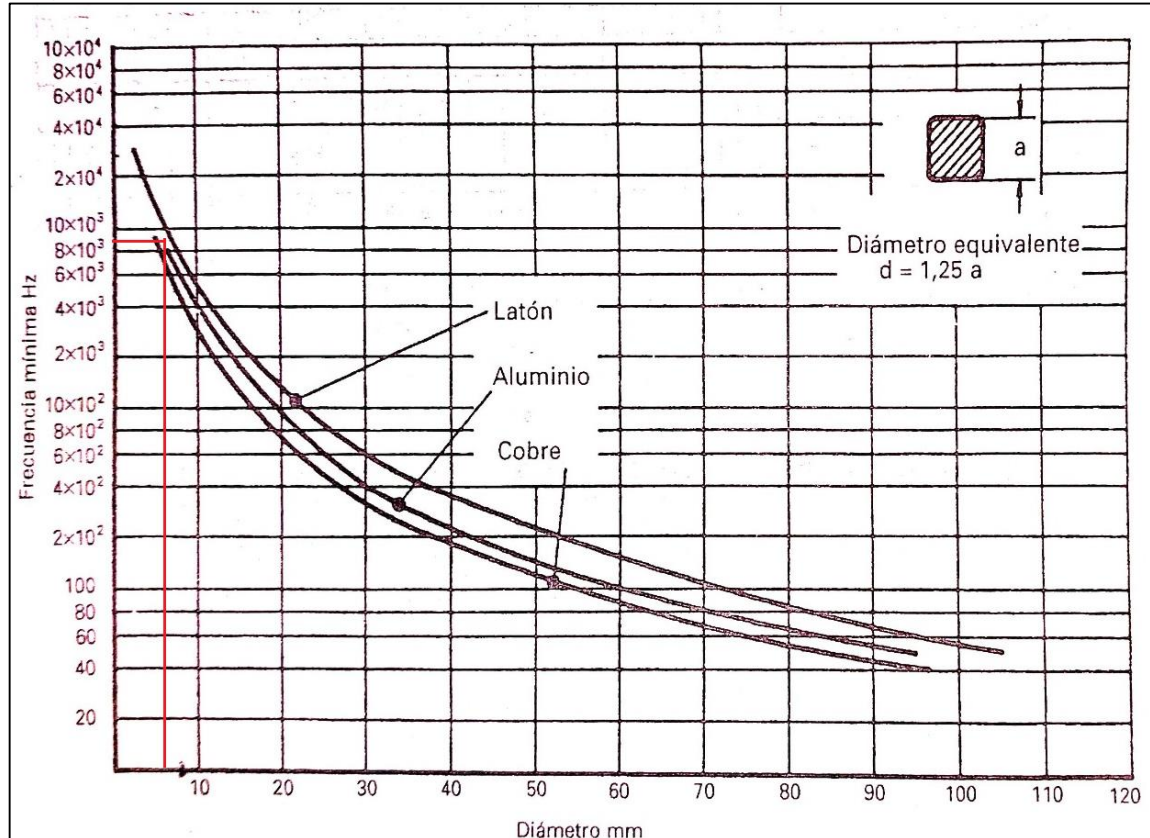
Imagen 30. Configuración bobina



Fuente: elaboración propia.

Conociendo el diámetro externo del tubo de la bobina se puede determinar la frecuencia nominal de red según Astigarraga por la imagen 31.

Imagen 31. Frecuencia por rendimiento óptimo



Fuente: ASTIGARRAGA URQUIZA, Julio y AGUIRRE ORMANZA, José Luis. Hornos industriales de inducción. Primera edición. McGraw-Hill interamericana. España,1995. P. 111.

De acuerdo a la proyección de la curva del material de aluminio y el diámetro del tubo se determina la frecuencia, que entre más alta sea mayor será el rendimiento por lo que se determina que la frecuencia de trabajo será 10.000 Hz

La resistencia del aluminio es importante en el sistema de calentamiento porque se opone al flujo de la corriente que fluye por la bobina inductora permitiendo la excitación y fricción de los átomos de la carga, el campo magnético generado por el paso de la corriente en la bobina y la resistencia que se genera a dicho flujo de corriente calienta la pieza de carga (aluminio), haciendo necesario hallar el valor de la resistencia del material mediante la ecuación 5:

Ecuación 5. Resistencia del material.

$$R_s = \frac{p * l_{carga}}{Area} = \frac{\pi * p * D_{carga}}{\delta * l_{carga}} (\Omega)^{21}$$

²¹ ASTIGARRAGA URQUIZA, Julio y AGUIRRE ORMAZA, José Luis. Hornos industriales de inducción. Primera edición. México D.F: Mc Graw Hill, 1999. p. 12.

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

Donde:

p = Resistividad eléctrica del material de carga.

δ = Profundidad de piel.

La profundidad de la piel la distancia que debe recorrer el calor desde la superficie al interior de la pieza la cual se determina por la ecuación 6:

Ecuación 6. Profundidad de piel.

$$\delta = \sqrt{\frac{2 * p}{\mu * \omega}} \quad (m)^{22}$$

Fuente: GONZALES Winder, Diseño y construcción de bobinas de calentamiento para hornos de inducción electromagnética. Primera edición. Caracas: Universidad Simón Bolívar

Donde:

μ = Permeabilidad magnética.

ω = Frecuencia angular.

Para despejar la permeabilidad relativa magnética del aluminio, se obtiene de la ecuación 7;

Ecuación 7. Permeabilidad relativa.

$$\mu = \mu_0 * \mu_r$$

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

Donde;

μ = Permeabilidad del material

μ_0 = Permeabilidad magnética del vacío = $4\pi * 10^{-7} \text{ N/A}^2$

μ_r = Permeabilidad relativa del aluminio = $1,000023 \approx 1$

Como la permeabilidad del aluminio es 1, se utiliza la permeabilidad magnética del vacío.

²² GONZALES Winder, Diseño y construcción de bobinas de calentamiento para hornos de inducción electromagnética. Primera edición. Caracas: Universidad Simón Bolívar, 2012 p 30

Teniendo en cuenta que el horno fundirá 3 kg de material y es para uso de laboratorio con una potencia de 1.911,48 W, la frecuencia se puede clasificar en frecuencia media como lo muestra la imagen 32:

Imagen 32 Tipo de frecuencias según capacidad 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: LANDAZURI, F. Diseño y construcción de hornos 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>.

Para determinar la frecuencia angular (ω) se determina con la siguiente ecuación (BASTIAN, Peter, 2001).

$$\omega = 2 * \pi * f \left(\frac{rad}{s} \right)$$

Donde;

f = Frecuencia

Remplazando:

$$\omega = 2 * \pi * 10.000 \text{ Hz} = 62.831,85 \left(\frac{rad}{s} \right)$$

Y teniendo la frecuencia angular se determina la profundidad de piel

$$\delta = \sqrt{\frac{2 * 8,5 * 10^{-8} \Omega m}{4\pi * 10^{-7} \text{ H/m} * 62.831,85 \frac{rad}{s}}} = 1,46 * 10^{-4} \text{ m}$$

La resistencia se despeja

$$R_s = \frac{\pi * 8,5 * 10^{-8} \Omega m * 0,088m}{1,46 * 10^{-4} \text{ m} * 0,213m} = 7,56 * 10^{-4} \Omega$$

Por último, se debe conocer la corriente que debe inducir la bobina, la potencia superficial en la pieza y la intensidad del campo magnético, para esta se debe conocer la potencia disipada y el área transversal de la carga. La potencia superficial se describe por la siguiente ecuación 8:

Ecuación 8 Potencia superficial

$$P_{sur} = \frac{\Delta T * c * \rho * D_{carga}}{t * 4} \left(\frac{W}{m^2}\right)^{23}$$

Fuente: 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

Donde:

P_{sur} = Potencia superficial material de carga.

ΔT = Delta de temperatura

c = Calor específico

t = Tiempo de calentamiento

ρ = Densidad del material

$$P_{sur} = \frac{720 \text{ }^\circ\text{C} * 897 \frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} * 2.698,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0.088 \text{ m}}{900 \text{ s} * 4}$$

$$P_{sur} = 42.600.18 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

La intensidad del campo magnético²⁴ se halla por la ecuación9:

Ecuación 9: Intensidad del campo magnético.

$$H = \frac{N_p * I_{entrada}}{l_{carga}}$$

Fuente: CHAPMAN, S. J. Maquinas eléctricas. Quinta edición. Bogotá D.C: Editorial McGraw-Hill, 2012. p. 9.

La potencia superficial se puede dar en términos de la intensidad del campo magnético haciendo un despeje

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

²³ 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.

²⁴ CHAPMAN, S. J. Maquinas eléctricas. Quinta edición. Bogotá D.C: Editorial McGraw-Hill, 2012. p. 9.

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

$$P_{sur} = \frac{(Np * Ip)^2 * \pi * \rho * D}{\delta * l} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Definida la anterior ecuación se realiza ley de extremos, se obtiene:

$$P_{sur} = \frac{(Np * Ip)^2 * \rho}{\delta * lcarga^2} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Se procede a reemplazar por la ecuación de profundidad de piel.

$$P_{sur} = \frac{(Np * Ip)^2 * \rho}{\sqrt{\frac{2 * \rho}{\mu * \omega}} * lcarga^2} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

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

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

Resolviendo:

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

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

Despejamos la intensidad del campo magnético para después poder despejar la corriente que se transmitirá a la carga

$$H = \sqrt{\frac{P_{sur}}{\sqrt{\rho * \mu * \pi * f}}} \left(\frac{A * \# \text{ de vueltas}}{m} \right)^{25}$$

Remplazamos los valores y obtenemos:

²⁵ CHAPMAN, S. J. Maquinas eléctricas. Tercera edición. Bogotá D.C: Editorial McGraw-Hill, 1987. p. 9.

$$H = \sqrt{\frac{42.600,18 \frac{W}{m^2}}{\sqrt{8,5 * 10^{-8} \Omega m * 4 * 10^{-7} H/m * \pi * 10.000 HZ}}} \left(\frac{A * \# \text{ de vueltas}}{m} \right)$$

$$H = 36.103,43 \frac{(A * \# \text{ de vueltas})}{m}$$

$$H = 3.068,79 A * \# \text{ de vueltas}$$

Con la intensidad de campo definida 3.068,79 Amperios por vuelta, se halla la corriente primaria, teniendo en cuenta el número total de espiras seleccionadas anteriormente.

$$I_p = \frac{3.068,79 (A * \# \text{ de vueltas})}{9 \text{ vueltas}} = 340.97 A$$

3.4 FUENTE DE PODER

Los requerimientos eléctricos del laboratorio como el suministro de energía eléctrica que es de 220 V, 60 Hz lo cual implica que para una carga de 2.091 W se maneje una corriente de:

$$I_{in} = \frac{P}{V} (A)$$

Donde:

$$I_{in} = \frac{2.090,66W}{220 V}$$

$$I_{in} = 9.5 A$$

Con la ayuda de la empresa IEPF S.A.S encargada de la distribución y diseño de hornos por inducción a nivel industrial, se aseguró las características que debe tener como mínimo una fuente de poder, logrando conseguir de manera exacta los datos y medidas específicas de esta que 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= 300 mm.
- Largo= 120 mm.
- Profundidad =330 mm

Como se observa en la imagen 33:

Imagen 33. Fuente de poder



Fuente: elaboración propia, con base en: IEPF SAS. [citado:3 de enero de 2019].

De acuerdo con los requerimientos de diseño se debe garantizar que la fuente de poder genere 10 kW de potencia que es lo mínimo trabajado por los equipos comerciales y una señal de salida 10 kHz.

3.5 SISTEMA DE REFRIGERACION

El sistema de refrigeración se selecciona con las siguientes características, pero para la selección debe tener en cuenta las siguientes especificaciones del equipo:

Set. Torre de refrigeración
 Set. Bomba Circulación de Agua.
 Torre Evaporaría Bomba Recirculación

3.5.1 Valores unidad de fusión – convertidor

- Tipo: 5M PMI 15 kW IGBT
- Potencia Nominal: 10 kW
- Potencia requerida (Transformador): 15 kVA
- Voltaje de Entrada (Convertidor): 440 V - 6 pulsos
- Voltaje de Entrada (Transformador): V (Por el Cliente)
- Rango Voltaje de Entrada: 380/440-%20 +%15
- Voltaje de Entrada (Dispositivos Auxiliares): 380/440 V \pm %10 / 60 Hz

Estos valores tienen tolerancia $\pm 5\%$ dependiendo del material refractario, calidad de la materia prima, carga apropiada y la habilidad del operador. Consumo de Energía para 1 Ton en potencia de entrada. El proceso de prueba 1992 se realiza de acuerdo a la norma de la IEC no: 60646.

3.5.2 Valores del sistema de refrigeración

Convertidor de Fusión

Requerimiento Refrigeración: 12.332 kcal

Conductividad del Agua: 3 $\mu\text{s}/\text{m}$

Flujo del Agua (Para $\Delta t=5^\circ\text{C}$): 2 m^3/h

El agua de refrigeración se indica con las especificaciones que más adelante deben utilizarse para un funcionamiento seguro.

Sistema de aspersión del agua de refrigeración.

- Dureza (FR) 15
- Partículas Suspendidas (PPM Max) 10
- Alcalinidad (PH): 7.0/7.8
- Conductividad MR/cm

Esta agua debe ser purificada y tratada para evitar la corrosión (ver el anexo 4) para la selección de la manguera que llevara el agua a la bobina.

Los demás elementos se relacionan con los componentes dados por la empresa IEPF SAS quien asesora arma y hace el mantenimiento de estos equipos en Colombia.

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, por eso se debe tener en cuenta todas las especificaciones anterior mente nombradas de sistema. Ya que la bobina es responsable de generar el campo electromagnético no se debe permitir el incremento de su temperatura y evitar el efecto de acritud en donde se puede ver afectadas las propiedades físicas 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.

Teniendo el sistema de refrigeración se debe conocer cuánto calor debe retirar de la bobina, por lo que se procede a calcularlo teniendo en cuenta que la bobina no puede superar una temperatura de 40°C , debido a que si lo hiciera podría verse afectada y dañar el proceso de fundición. Con la ecuación 10 se puede determinar cuánto calor se debe retirar.

Ecuación 10 Perdida de calor por refrigeración.

$$Q_{tr} = Q_{sc} + Q_l + Q_{sb} \quad (J)^{26}$$

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

Donde:

Q_{tr} = Calor total a retirar.

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

Q_{sb} = Calor sensible de la bobina.

Q_l = Calor latente de fusión

El calor sensible del aluminio está dado por la siguiente ecuación.

$$Q_{sc} = m * \Delta T * c$$

$$Q_{sc} = 3 \text{ kg} * 640^\circ\text{C} * 897 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$Q_{sc} = 1.722.240 \text{ J}$$

Esta fórmula se le aplica de igual manera a la bobina de cobre, donde no se conoce la masa de la bobina por lo que toca hallarla de la siguiente forma.

$$m_b = \rho_b * h * (r_e^2 - r_i^2) \quad (\text{kg})$$

$$m_b = 8.960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,213\text{m} * ((0,008 \text{ m})^2 - (0,006 \text{ m})^2) \quad (\text{kg})$$

$$m_b = 0,0534 \text{ kg}$$

Una vez teniendo la masa de la bobina se reemplaza en la ecuación de calor sensible dando como resultante:

$$Q_{sb} = 0,0534 \text{ kg} * 20^\circ\text{C} * 390 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$Q_{sb} = 416,81 \text{ J}$$

²⁶ CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. Tercera edición. Ciudad de México D.F. McGraw Hill/Interamericana editores, 2007. p. 13.

Luego de conocer el calor sensible de cada elemento, se debe tener en cuenta el diámetro por donde pasa el fluido refrigerante para definir el perímetro mojado con la siguiente ecuación.

$$Ph = \pi * Dib (m)$$

Donde:

Ph = Perímetro mojado.

Dib = Diámetro interno de la bobina.

$$Ph = \pi * 0,006m = 0,0188 m$$

Es preciso utilizar las ecuaciones de canales de 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.²⁷

Ecuación 11. Perímetro de sistema de refrigeración.

$$Ph = \frac{\phi * Dib}{2} (m)$$

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

Donde:

ϕ = Ángulo de descarga.

Teniendo un valor de 90° del ángulo de descarga, se debe calcular el área de flujo, mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 12. Área de flujo

$$AF = \frac{(\phi - \sin\phi) * Dib^2}{8} (m^2)$$

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

Donde:

AF = Área de flujo.

²⁷ ROJAS, Hugo. "Diseño de canales". [En línea]. [04 julio de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/linoolascuagacruzado/diseo-de-canales>.

$$AF = \frac{(90^\circ - \sin 90^\circ) * (0.006m)^2}{8} = 0,00040 \text{ m}^2$$

Se halla el valor del radio medio hidráulico dado por la siguiente ecuación.

$$Rmh = \frac{1}{4} * \left(1 - \frac{\sin \phi}{\phi}\right) * Dib \text{ (m)}$$

Se reemplaza por

$$Rmh = \frac{1}{4} * \left(1 - \frac{\sin 90}{90}\right) * 0,006m$$

$$Rmh = 0,00148 \text{ m}$$

Se procede hallar la pendiente de fondo como se observa a continuación.

$$S = \sqrt{rib^2 + rib^2} \text{ (m)}$$

Donde:

S=Pendiente de fondo.

Se reemplaza por:

$$S = \sqrt{0,003^2m + 0,003^2m} = 0,00424 \text{ m}$$

Gracias a los datos anteriores se procede a determinar el valor del caudal, este es importante para la selección del equipo con el valor de la velocidad. Se determinan a partir de:

Ecuación 13 caudal del sistema de refrigeración.

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

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

Donde:

Q=Caudal.

Se reemplaza por:

$$Q = \left(\frac{1}{8}\right) * 0,00040 \text{ m}^2 * (0,00148 \text{ m})^{\frac{2}{3}} * (0,00424 \text{ m})^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = 0,0001511 \frac{m^3}{s} * \left(\frac{3600 s}{h} \right)$$

$$Q = 0,5439 \frac{m^3}{h}$$

Por último, se procede hallar la velocidad del caudal

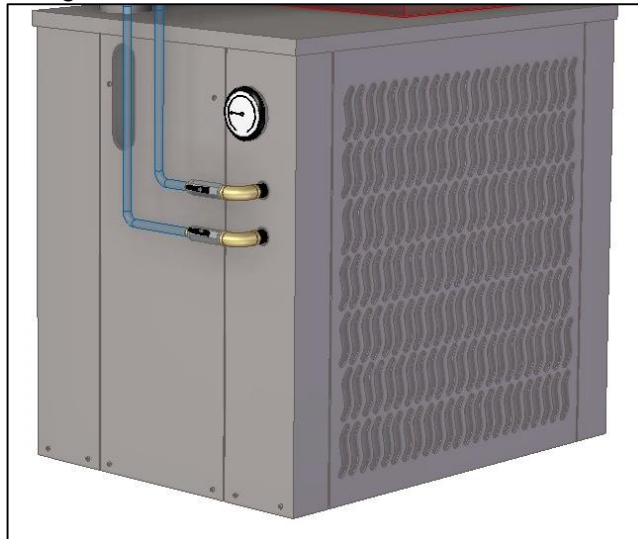
$$\dot{V} = \frac{Q}{A_F} \left(\frac{m}{h} \right)$$

Se reemplaza

$$\dot{V} = \frac{0,5439 \frac{m^3}{h}}{0,00040 m^2} = 1.359,9 \left(\frac{m}{h} \right)$$

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 mediante un intercambio de calor, para este caso del horno por inducción es necesario enfriar la bobina cumpliendo con los parámetros de conexión como se observa en la imagen 3.

Imagen 34. conexión con el Chiller

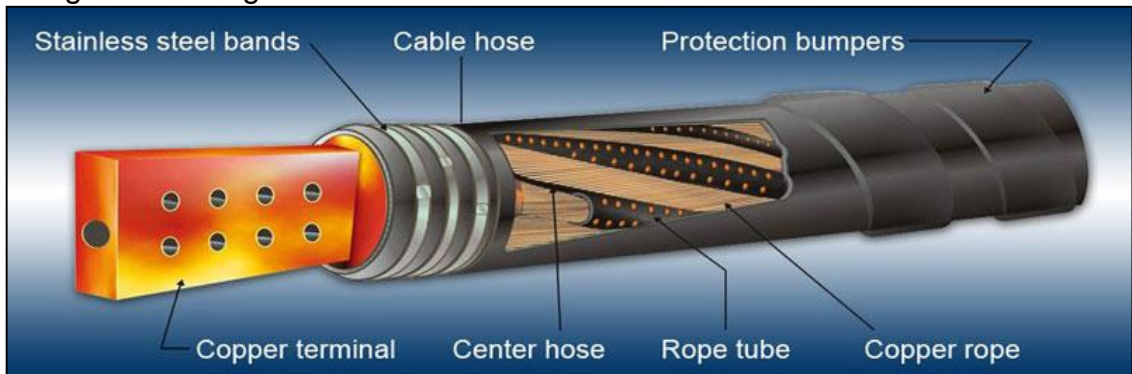


Fuente: elaboración propia

3.6 BUSBAR

Es un conductor eléctrico, que hace referencia a una manguera libre de carbón mantenida a un voltaje específico y capaz de transportar una alta corriente y agua, forma parte importante del horno ya que su función es de conectar la fuente de poder a la bobina transportando la corriente y a su vez otra conexión va al sistema de refrigeración y a la bobina para el paso de agua como se observa en la imagen 35

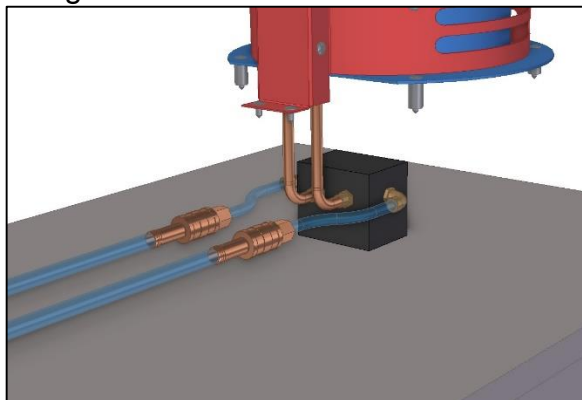
Imagen 35. Manguera libre de carbono



Fuente: COPYRIGHT. Conexiones hidráulicas y conjunto de mangueras flexibles [citado:6 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.boxerindia.com>

El busbar es la manguera que me permite el paso de agua y corriente a la bobina, su aplicación en el proceso de inducción para fundición es extensa y se hace la selección por diámetro del anexo 4. En la imagen 36 se observa donde se realizan las conexiones.

Imagen 36. Conexiones Busbar



Fuente: elaboración propia

3.7 TRANSFERENCIA DE CALOR

Los cálculos de transferencia del horno de inducción se hacen para asegurar que la temperatura del exterior no afecte a los estudiantes generando quemaduras graves por lo que se determina que la temperatura a la que la parte exterior del horno debe alcanzar es de 50°C como máximo, siendo la temperatura que el cuerpo humano resiste al contacto con superficies calientes.

Para iniciar con los cálculos hay que conocer los materiales que conforman las paredes de transmisión de calor del horno de inducción, con sus características. En la imagen 37, se verán las paredes de transferencia de calor.

Imagen 37. Paredes del horno de inducción



Fuente: elaboración propia

Están compuestas por los siguientes componentes:

3.7.1 Crisol de grafito. Es la primera pared térmica que se encuentra entre el material fundido y el cerámico, como se habló anteriormente se escoge por selección, pero se debe tener en cuenta las propiedades más importantes como son:

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

3.7.2 Cerámico crisol. Este cerámico está diseñado de alúmina, se tiene en cuenta las mismas propiedades del crisol para adaptarse a los requerimientos del diseño, el fabricante de crisol también permite hacer la selección del cerámico que esta estandarizado y sus medidas son:

- Diámetro externo superior = 128 mm.
- Diámetro exterior inferior = 110,66 mm.
- Diámetro interior = 112,36 mm.
- Altura total del cerámico = 240 mm.

3.7.3 Cemento refractario. Para el segundo aislante se utiliza cemento refractario el cual se moldea en un proceso para mayor aislamiento, con excelentes propiedades que evitan la propagación de calor. Encargado de rodear la bobina se diseña con un espesor de 20 mm y sus medidas son:

- Diámetro externo = 186 mm.
- Diámetro interior = 146 mm.
- Altura total del cemento refractario = 260 mm.

3.7.4. Recubrimiento exterior. Lo que se busca con este recubrimiento es proteger el cemento refractario y los componentes internos del horno, el material usado para su diseño es un acero ANSI A36 teniendo en cuenta que es de fácil acceso con un espesor normalizado de 1,2 mm

- Diámetro externo = 188 mm.
- Altura total del recubrimiento = 260 mm.

3.7.5 Cálculos térmicos de las paredes. Para el desarrollo de los cálculos se tiene en cuenta que las paredes son cilíndricas, la energía necesaria en el proceso para la fundición del aluminio está dada por la ecuación 14.

Ecuación 14 Calor global

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

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

Donde:

Q_{global} = Calor global en el 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 20°C a 660°C del material de carga, para este cálculo la ecuación 15.

Ecuación 15 Calor sensible.

$$Q_s = m * C * \Delta T \text{ (J)}$$

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

Donde:

ΔT =Delta de temperatura del material de carga.

El calor latente provee la energía necesaria para el cambio de fase donde el material empieza a pasar de estado sólido a líquido, para calcular el calor latente se utiliza la siguiente ecuación

Ecuación 16 Calor latente

$$Q_l = m * Clf \text{ (J)}$$

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

Donde:

Clf = calor latente de fusión es de 388.000J/Kg

Con estas ecuaciones anteriores se procede a realizar el cálculo del calor global con el material de carga en Excel como se observa en la tabla 10

Tabla 10. Calor global del aluminio

Descripción	Valor	Unidad
Calor para elevar de 20°C a 720 °C	1.881.600	J
	2.091	W
Calor latente	1.164.000	J
	1.293	W
Calor global	3384	W

Fuente: elaboración propia.

Una vez determinado el calor global se procede a calcular la transferencia de calor por conducción de paredes en estado estacionario, para ello se debe conocer la resistencia térmica²⁸ en cilindros, mediante la siguiente ecuación

$$Q_{global} = \frac{T1 - T2}{R} \quad (W)$$

Donde:

T1= Temperatura inicial de cada pared.

T2= Temperatura final de cada pared.

R= Resistencia térmica de cada pared.

La resistencia térmica²⁹ se calcula de la siguiente manera:

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r2}{r1}\right)}{2 * \pi * l_{bobina} * K} \quad \left(\frac{K}{W}\right)$$

Donde:

r1= Radio menor de la pared.

r2 = Radio mayor de la pared.

K= Conductividad térmica del material de cada pared.

Estas ecuaciones se utilizarán para cada material seleccionado que compone el horno, con el valor del calor global que genera el material de carga fundida se comienza de adentro hacia afuera para determinar los cálculos.

Teniendo en cuenta la ecuación de resistencia térmica se halla el valor para el crisol.

$$R_c = \frac{\ln\left(\frac{0,056m}{0,044m}\right)}{2 * \pi * 0,213m * 58 \frac{W}{m * K}}$$

$$R_c = 3,107 * 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Una vez encontrado el valor de la resistencia se determina el valor de temperatura exterior del crisol

²⁸ CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. Tercera edición. Ciudad de México. McGraw Hill/Interamericana editores, 2007. p. 150.

²⁹CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. Tercera edición. Ciudad de México. McGraw Hill/Interamericana editores, 2007. p. 151.

$$3.384 W = \frac{720^{\circ}C - T2}{3,107 * 10^{-3} \frac{k}{W}} (W)$$

$$T2 = 709,48^{\circ}C$$

Se realiza el mismo proceso para cada pared del horno.

Con la ecuación de resistencia térmica se halla el valor para el cerámico crisol.

$$R_{cc} = \frac{\ln\left(\frac{0,064m}{0,056m}\right)}{2 * \pi * 0,213 m * 1.1 \frac{W}{m * K}}$$

$$R_{cc} = 0,091 \frac{K}{W}$$

Una vez encontrado el valor de la resistencia se debe obtener el valor de temperatura exterior del cerámico crisol

$$3.384 W = \frac{709,48^{\circ}C - T3}{0,091 \frac{K}{W}} (W)$$

$$T3 = 359,3^{\circ}C$$

Para la bobina se utiliza el radio externo dado por el diseño de esta, se halla la resistencia térmica utilizando las propiedades del cobre que es el material de la bobina.

$$R_b = \frac{\ln\left(\frac{0,073m}{0,064m}\right)}{2 * \pi * 0,213m * 352 \frac{W}{m * k}}$$

$$R_b = 2,793 * 10^{-4} \frac{K}{W}$$

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

$$3.204,8 w = \frac{40^{\circ}C - T4}{2,793 * 10^{-4} \frac{K}{W}}$$

$$T4 = 39,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Utilizando la ecuación de resistencia térmica se hallará el valor para el Cemento refractario

$$R_{cr} = \frac{\ln\left(\frac{0,093 \text{ m}}{0,073 \text{ m}}\right)}{2 * \pi * 0,213 \text{ m} * 0,29 \frac{W}{m * K}}$$

$$R_{cr} = 0,623 \frac{K}{W}$$

Una vez encontrado el valor de la resistencia se debe hallar el valor de temperatura exterior del Cemento refractario

$$14,60 \text{ W} = \frac{39,1^\circ\text{C} - T5}{0,623 \frac{K}{W}} \quad (W)$$

$$T5 = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El 14,60w es el calor global resultante una vez que la bobina es refrigerada para conservar una temperatura de 40°C en el proceso. Teniendo en cuenta que el recubrimiento se diseña con un acero ANSI A36, se procede a determinar su resistencia térmica.

$$R_r = \frac{\ln\left(\frac{0,094 \text{ m}}{0,093 \text{ m}}\right)}{2 * \pi * 0,213 \text{ m} * 47 \frac{W}{m * K}}$$

$$R_r = 0,00017 \frac{K}{W}$$

Establecida la resistencia termina de la carcasa, se desea saber la temperatura en la pared externa, este recubrimiento debe estar a una temperatura factible al contacto

$$14,60 \text{ W} = \frac{30^\circ\text{C} - T6}{0,00017 \frac{K}{W}} \quad (W)$$

$$T6 = 29,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por seguridad se le instalara otro recubrimiento el cual asegurara la protección del estudiante dado que la temperatura llegara hacer mayor a la hallada anteriormente.

Como se estableció la temperatura debe ser menor que 50°C y la temperatura final es de 29°C el horno cumple con los requerimientos de diseño.

3.7.1 Pérdidas en la pared cilíndrica. “La transferencia de calor estacionaria a través de cascos cilíndricos o esféricos de varias capas se pueden manejar como en las paredes planas de capas múltiples, al sumar una resistencia adicional en serie por cada capa adicional, para el caso del material refractario presente en el horno de fundición”³⁰. Primero se debe determina la resistencia total que consiste en sumar todas las resistencias que se hallaron de cada capa más el coeficiente de transferencia de calor por convección que según los libros de TRINKS es aproximada mente igual a 600 W/ m² °C. y se determina de la siguiente manera.

Donde la resistencia total (Rtotal) viene dada por:

$$R_{total} = \frac{1}{hA} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * l_{bobina} * K} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 * \pi * l_{bobina} * K} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2 * \pi * l_{bobina} * K} \left(\frac{K}{W}\right)^{31}$$

$$R_{total} = 0,8464 \frac{K}{W}$$

Las pérdidas de calor, se sacan tomando solo los materiales refractarios y el crisol, ya que la capa de exterior al ser de acero muy delgado se desprecia. El valor de las pérdidas se obtiene de la siguiente formula:

$$\dot{Q}_p = \frac{T_1 - T_6}{R_{total}} = 696,37 W$$

Las pérdidas totales de transferencia de calor del horno de inducción son de 0,7 kW

³⁰ PEREZ PINO Fredy y SOTO Enrique. Diseño, cálculo y construcción de un horno de fundición de aluminio tipo basculante y sus moldes. Universidad de pamplona facultad de ingenierías y arquitectura departamento de ingeniería mecánica. Pamplona 2009

³¹ PEREZ PINO Fredy y SOTO Enrique. Diseño, cálculo y construcción de un horno de fundición de aluminio tipo basculante y sus moldes. Universidad de pamplona facultad de ingenierías y arquitectura departamento de ingeniería mecánica. Pamplona 2009

4.SIMULACION TERMICA

Por medio de NX Nastran de solid Edge se realiza el análisis de transferencia de calor de los componentes que mayor resistencia generan, teniendo en cuenta el tiempo de trabajo y las características de cada material que lo componen, se procede hacer la simulación para determinar si los cálculos del capítulo de transferencia dan como resultado algo apropiado para este modelo.

4.1 ANALISIS TERMICO DEL CRISOL

Se ingresan los datos principales en el programa, como se ve en las siguientes tablas

Tabla 11. Propiedades del crisol

PROPIEDAD DEL ESTUDIO		VALOR		
Nombre del estudio		Estudio de transferencia de calor transitorio 2		
Tipo de estudio		Estudio de transferencia de calor transitorio		
Tipo de mallado		Tetraédrico		
Solucionador iterativo		Activado		
Verificación de geometría de NX Nastran		Activado		
Tiempo final -		900 s		
Incremento del tiempo de cálculo -		180.00 s		
Paso de salida -		1 s		
Opción de sólo resultados de superficie		Activado		
Nombre del sólido	Material	Masa	Volumen	Peso
Crisol. Par	Grafito	2.174 kg	1.040 L	21,3 N

Fuente: elaboración propia, con base en: NX Nastran de Solid Edge

Tabla 12. Propiedades del material Grafito

Propiedad	Valor
Densidad	2.090 g/cm ³
Conductividad térmica	58.000 W/m °C
Calor específico	710.000 J/kg K
Coefficiente de Poisson	0.280

Fuente: elaboración propia, con base en: NX Nastran de Solid Edge

Teniendo las características del material, sus propiedades y medidas ingresadas al programa, se procede a acomodar las cargas en dirección al flujo de temperatura

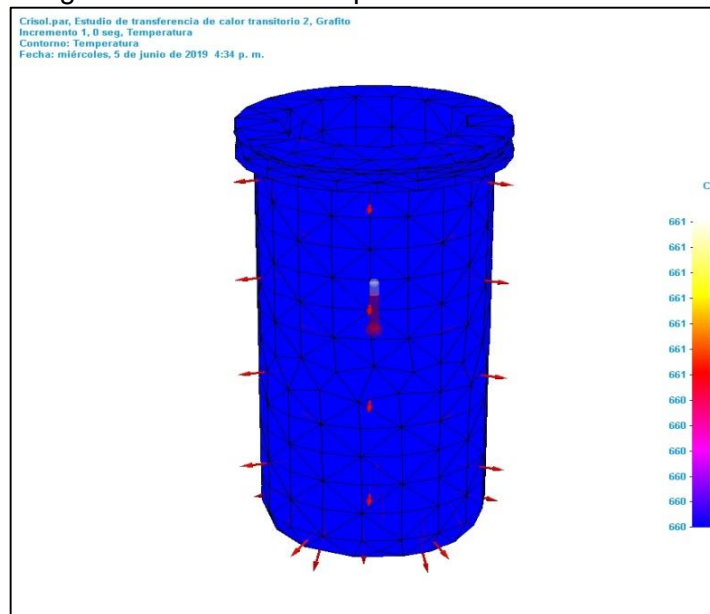
Tabla 13. Cargas del crisol

Nombre de carga	Tipo de carga	Valor de carga	Dirección de carga	Opción de dirección de carga
Temperatura de cuerpo 1	Temperatura de cuerpo	660 C		
Convección 1	Convección	Coeficiente laminar =58 W/m ² -K, Temperatura ambiente =650 C	Negativo	Perpendicular a cara

Fuente: elaboración propia, con base en: NX Nastran de Solid Edge

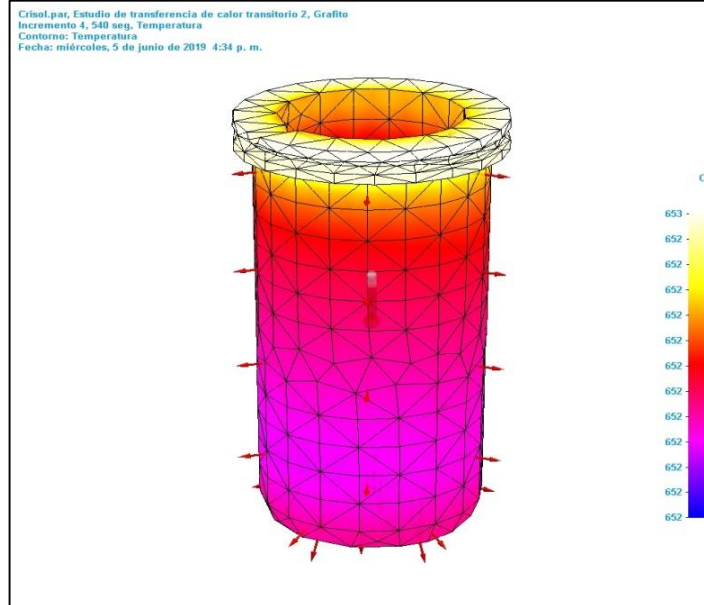
Se procede hacer el análisis de resultado por tiempos de proceso cada 180 Segundos hasta completar los 15 minutos, en las imágenes 38, 39, 40, 41 y 40, se observan los cambios que van realizando a medida que ocurre la transferencia de calor.

Imagen 38. Crisol a la temperatura ambiente



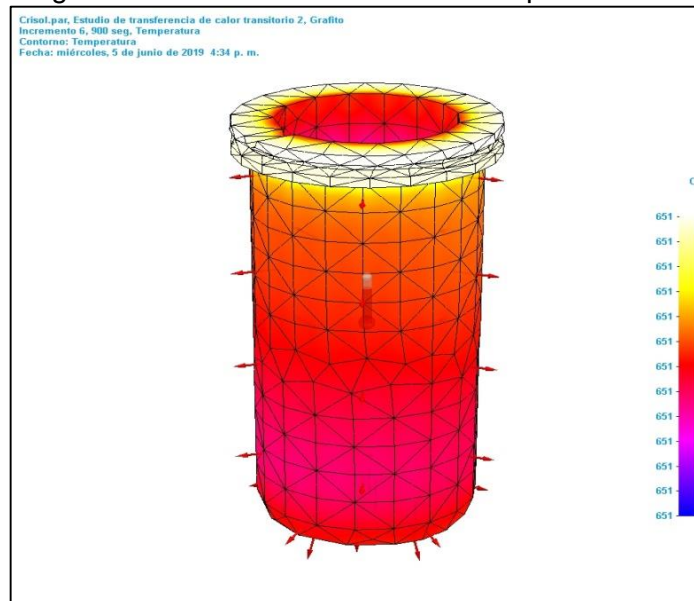
Fuente: elaboración propia, con base en: NX Nastran de Solid Edge

Imagen 41. Calentamiento a 540 s de iniciar el proceso



Fuente: elaboración propia, con base en: NX Nastran de Solid Edge

Imagen 42. Calentamiento al finalizar el proceso



Fuente: elaboración propia, con base en: NX Nastran de Solid Edge

Observando en las imágenes de resultados a medida que transcurre el tiempo de calentamiento del crisol, es más notable los cambios de temperatura que refleja en sus paredes por transferencia de la carga, la pared exterior alcanza 651°C de

temperatura por la resistencia del material que se opone al paso de calor como se obtienen en los cálculos del capítulo anterior.

4.2 ANALISIS TERMICO DEL RECUBRIMIENTO CERÁMICO DEL CRISOL

Está compuesto de material de alúmina, sus condiciones de diseño se dan por selección de catálogo, se ingresa los datos principales a tener en cuenta al programa, como se ve en la siguiente tabla

Tabla 14. Propiedades del Cerámico crisol

Propiedad del estudio		Valor		
Nombre del estudio		Estudio de transferencia de calor transitorio 4		
Tipo de estudio		Estudio de transferencia de calor transitorio		
Tipo de mallado		Tetraédrico		
Solucionador iterativo		Activado		
Verificación de geometría de NX Nastran		Activado		
Formulación alterna		No		
Tiempo final -		900 s		
Incremento del tiempo de cálculo -		180 s		
Paso de salida -		1 s		
Opción de sólo resultados de superficie		Activado		
Nombre del sólido	Material	Masa	Volumen	Peso
Cerámico 1.par	Alúmina	3.067 kg	0.001 m ³	30,1 N

Fuente: elaboración propia, con base en: NX Nastran de Solid Edge

Tabla 15. Propiedades del Alúmina

Propiedad	Valor
Densidad	3.900 g/cm ³
Conductividad térmica	1.100 W/m-C
Calor específico	850.000 J/kg-K
Coefficiente de Poisson	0.330

Fuente: elaboración propia; con base en: NX Nastran de Solid Edge

Teniendo las características del material, sus propiedades y medidas ingresadas al programa, se procede a acomodar las cargas en dirección al flujo de temperatura

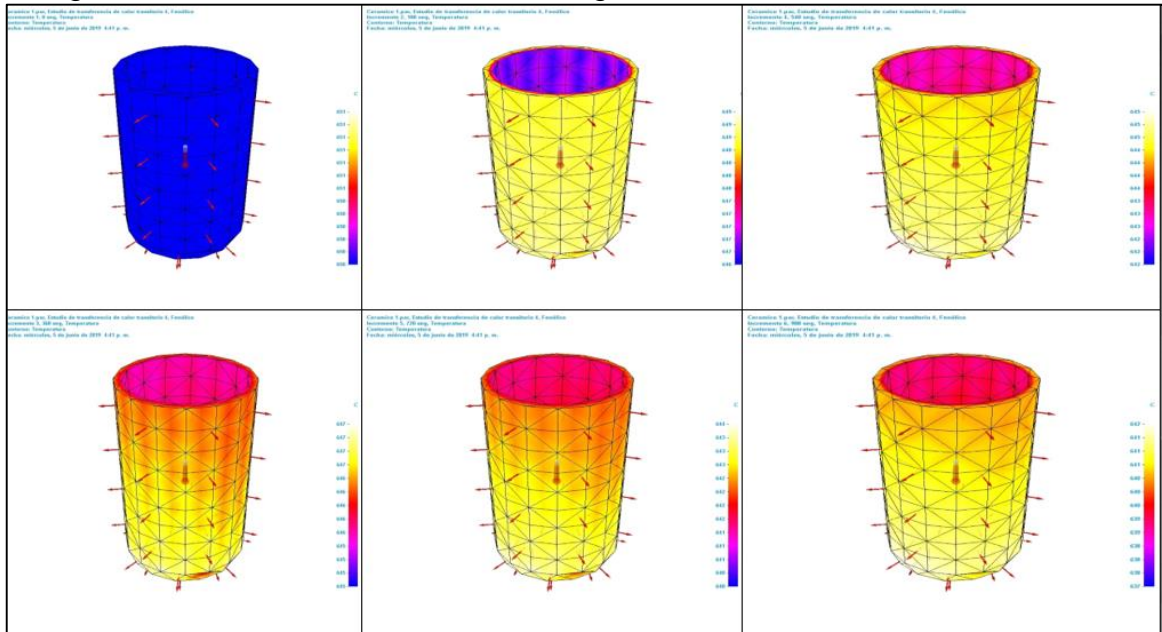
Tabla 16 Cargas del cerámico

Nombre de carga	Tipo de carga	Valor de carga	Dirección de carga	Opción de dirección de carga
Temperatura de cuerpo 1	Temperatura de cuerpo	650 C		
Convección 1	Convección	Coeficiente laminar =1.1 W/m ² -K, Temperatura ambiente =359 C	Negativo	Perpendicular a cara

Fuente: elaboración propia, con base en: NX Nastran de Solid Edge

Se procede hacer el análisis de resultado por tiempos de proceso igual que en el anterior análisis va cada 180 segundos hasta completar los 15 minutos, en la siguiente imagen se observa los cambios que va realizando a medida que ocurre la transferencia de calor

Imagen 43. Calentamiento de 0 a 900 segundo del cerámico



Fuente: elaboración propia, con base en: NX Nastran de Solid Edge

El paso del tiempo va de izquierda a derecha, como se observa en la imagen 43, en el recuadro final el color interno es rojizo debido al contacto que tiene con el crisol que genera una temperatura de 650 °C, gracias a el espesor y la resistencia la temperatura va disminuyendo a medida que pasa por la pared de cada elemento, pero en el cerámico influye el contacto directo con la bobina que también tratara de calentarse debido al paso de corriente que trascurre a través de ella.

La bobina como se analiza en los capítulos anteriores presenta dos condiciones que afectan la transferencia de calor, este elemento no debe superar los 40°C en el proceso, por lo que en su interior va a correr un refrigerante que debe retirar el calor producido en las capas interiores (crisol, cerámico), y el que se genera en ella por la resistencia eléctrica del cobre. El cerámico sin influencia de la bobina en su exterior tendría una temperatura de 359°C.

4.3 ANÁLISIS TÉRMICO DEL CEMENTO REFRACTARIO

Está compuesto de material de cemento refractario con crax1300. ver el catalogo en el anexo 5, sus condiciones de diseño se dan por selección de catálogo, se ingresa los datos principales a tener en cuenta al programa, como se ve en la siguiente tabla

Tabla 17. Propiedades del cemento refractario

Propiedad del estudio		Valor		
Nombre del estudio		Estudio de transferencia de calor transitorio 1		
Tipo de estudio		Estudio de transferencia de calor transitorio		
Tipo de mallado		Tetraédrico		
Solucionador iterativo		Activado		
Verificación de geometría de NX Nastran		Activado		
Formulación alterna		No		
Tiempo final -		900 s		
Incremento del tiempo de cálculo -		180 s		
Paso de salida -		1 s		
Opción de sólo resultados de superficie		Activado		
Nombre del sólido	Material	Masa	Volumen	Peso
cerámico 2.par	Cemento Refractario	7.002 kg	0.003 m ³	68.6 N

Fuente: elaboración propia, con base en: NX Nastran de Solid Edge

Tabla 18. Propiedades del Cemento Refractario

Propiedad	Valor
Densidad	2.300 kg/m ³
Conductividad térmica	0,290 W/m °C
Calor específico	0,960 J/kg K
Coefficiente de Poisson	0,150

Fuente: elaboración propia, con base en: NX Nastran de Solid Edge

Teniendo las características del material, sus propiedades y medidas ingresadas al programa, se procede a acomodar las cargas en dirección al flujo de temperatura

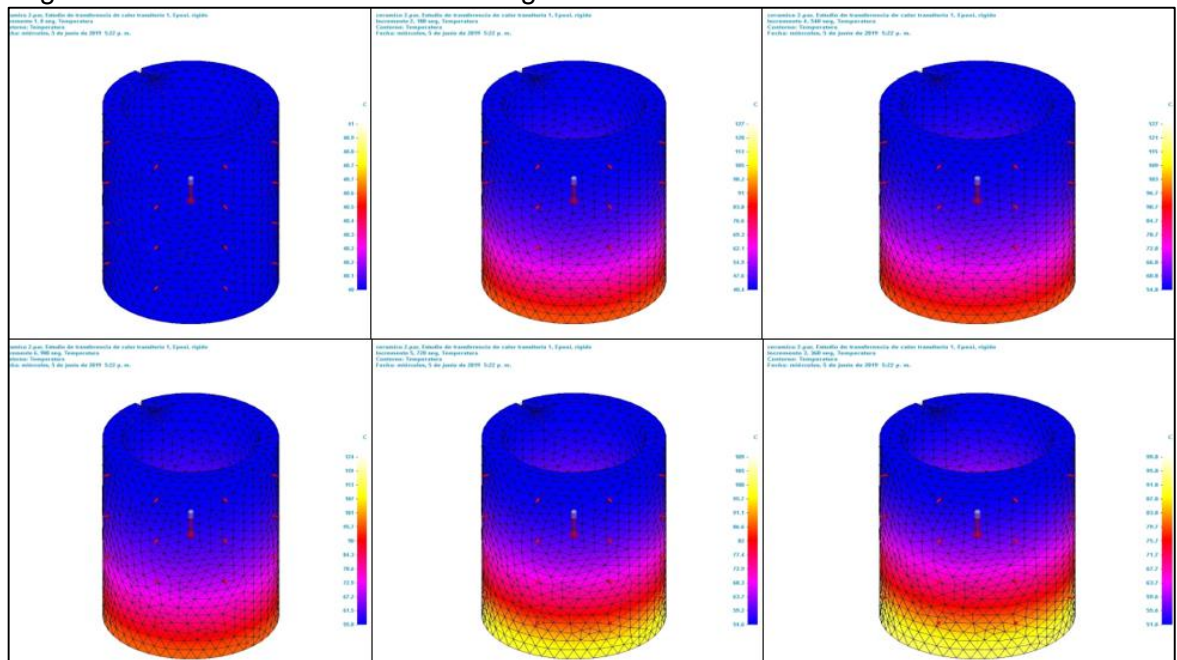
Tabla 19. Cargas del cemento refractario

Nombre de carga	Tipo de carga	Valor de carga	Dirección de carga	Opción de dirección de carga
Temperatura de cuerpo 1	Temperatura de cuerpo	40 C		
Convección 1	Convección	Coeficiente laminar =0.29 W/m ² -K, Temperatura ambiente =30 C	Negativo	Perpendicular a cara
Convección 2	Convección	Coeficiente laminar =0.29 W/m ² -K, Temperatura ambiente =359 C	Negativo	Perpendicular a cara

Fuente: elaboración propia, con base en: NX Nastran de Solid Edge

Se procede hacer el análisis de resultado por tiempos de proceso igual que en el anterior análisis va cada 180 segundos hasta completar los 15 minutos, en la imagen 44, se observa los cambios que va realizando a medida que ocurre la transferencia de calor

Imagen 44. Calentamiento de 0 a 900 segundo del Cemento

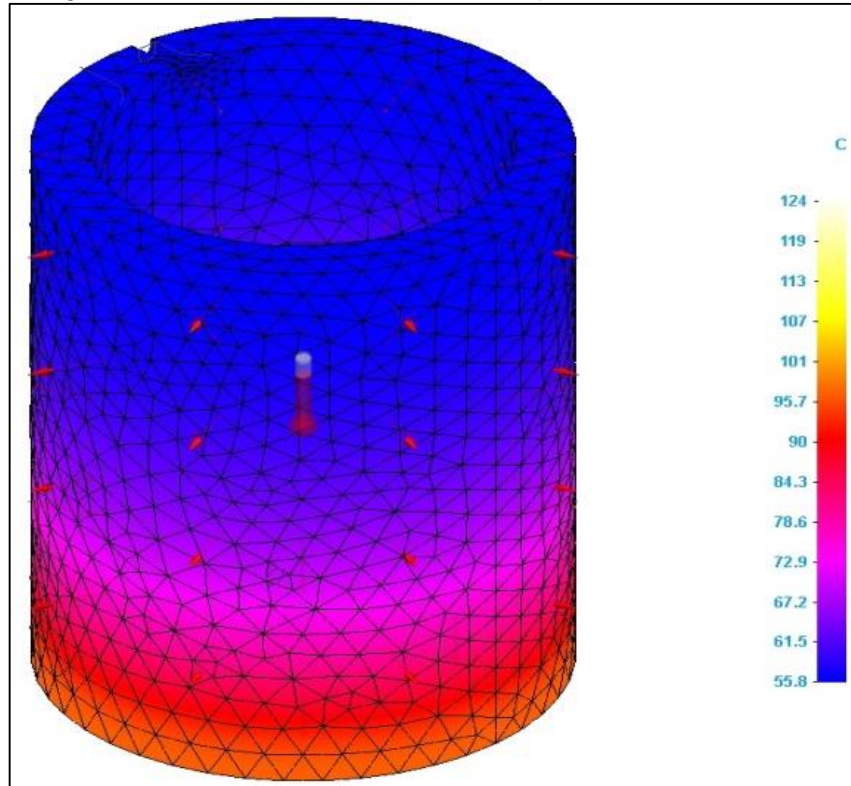


Fuente: elaboración propia, con base en: NX Nastran de Solid Edge

El paso del tiempo va de izquierda a derecha como se observa en la imagen, el calor de este elemento es solo en la parte inferior debido a que tiene contacto directo con el cerámico, en la pared que tiene contacto con la bobina refrigerada se observa

que la temperatura es menor. Este recubrimiento tiene una temperatura exterior hallada por cálculo de 30°C, mientras que en la simulación una vez transcurrido los 900 segundos, el exterior del cemento tiene una temperatura de 55.8°C

Imagen 45. Calentamiento al finalizar el proceso



Fuente: elaboración propia con base en NX Nastran de Solid Edge

Debido a que la lámina es de un acero ANSI A36 y su resistencia a la transferencia de calor es mínima, se diseña una malla de seguridad con separadores para que los estudiantes no tengan contacto con esta temperatura del cemento refractario

5. MANUALES DEL EQUIPO

Para que el horno por inducción funcione correctamente se debe realizar una buena operación por parte de los estudiante y operarios encargados del laboratorio; el mantenimiento es indispensable porque asegura la vida útil del equipo, ya que será realizado por parte de los operarios con los que cuenta la universidad se debe contar con un registro de estos mantenimientos, por este motivo debe ser un mantenimiento sencillo.

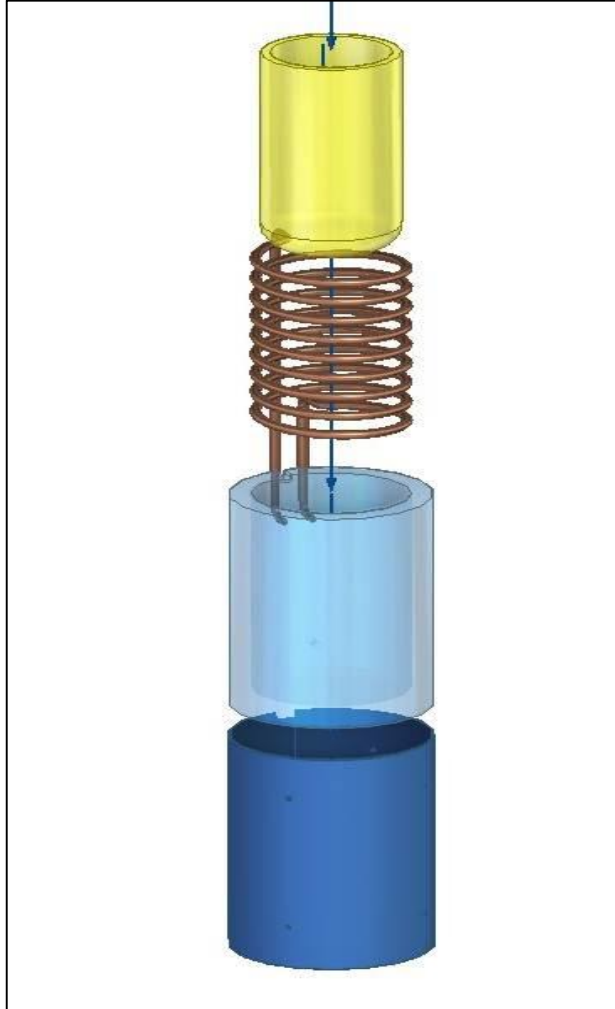
Se recomienda tener en cuenta estos manuales ya que de ellos depende la funcionalidad del horno y describe como hacer el mantenimiento del mismo.

5.1 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE HORNO

El manual de ensamble muestra paso a paso el proceso adecuado de armado, el cual se debe seguir al pie de la letra para garantizar el correcto funcionamiento del horno.

El primer paso que se debe seguir para el montaje es la unión de los componentes cerámicos con la bobina, introduzca el cemento refractario dentro de la lámina de acero adecuándolo de tal forma que encajen con la ranura los tubos de la bobina, por ultimo ingrese el cerámico en el centro de la bobina. Como se observa en la imagen 46:

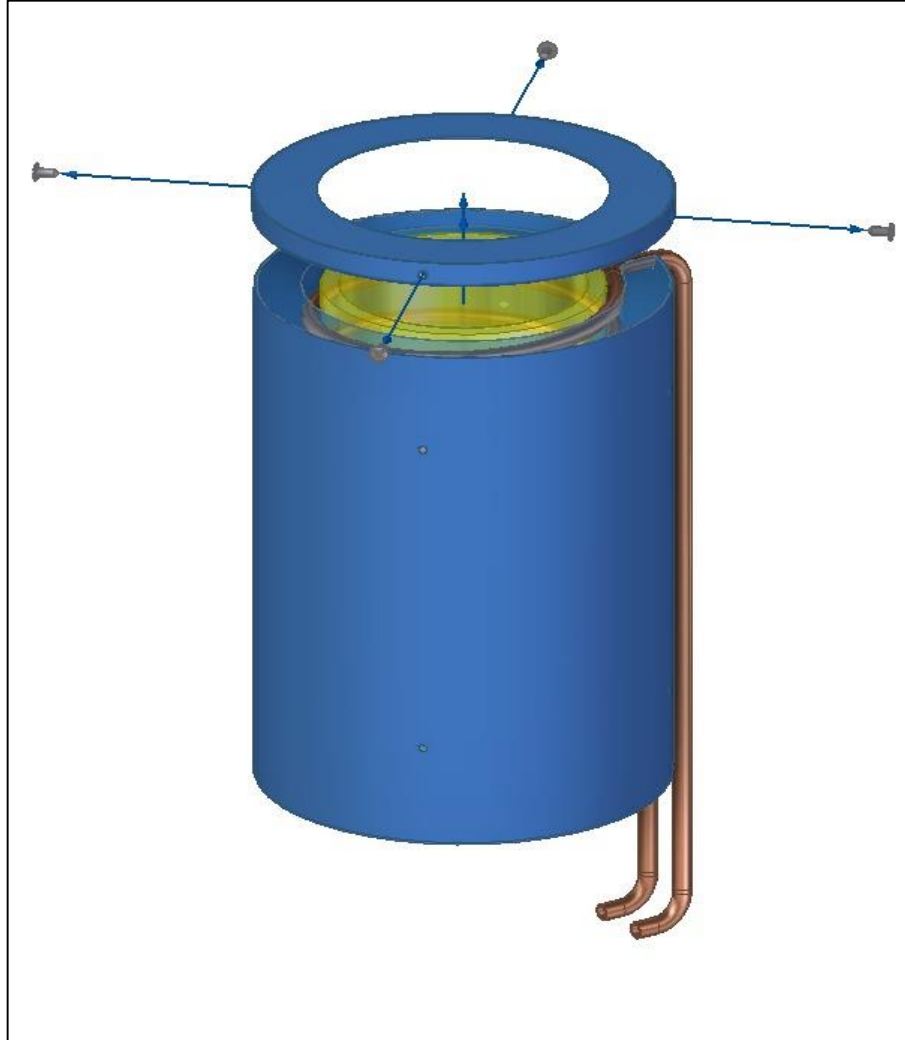
Imagen 46. Acople interno del horno



Fuente: elaboración propia

Realizado el proceso anterior coloque la tapa del recubrimiento exterior es necesario ensamblar los 4 tornillos M4 de 10mm, para que no se vean los componentes internos como se observa en la imagen 47.

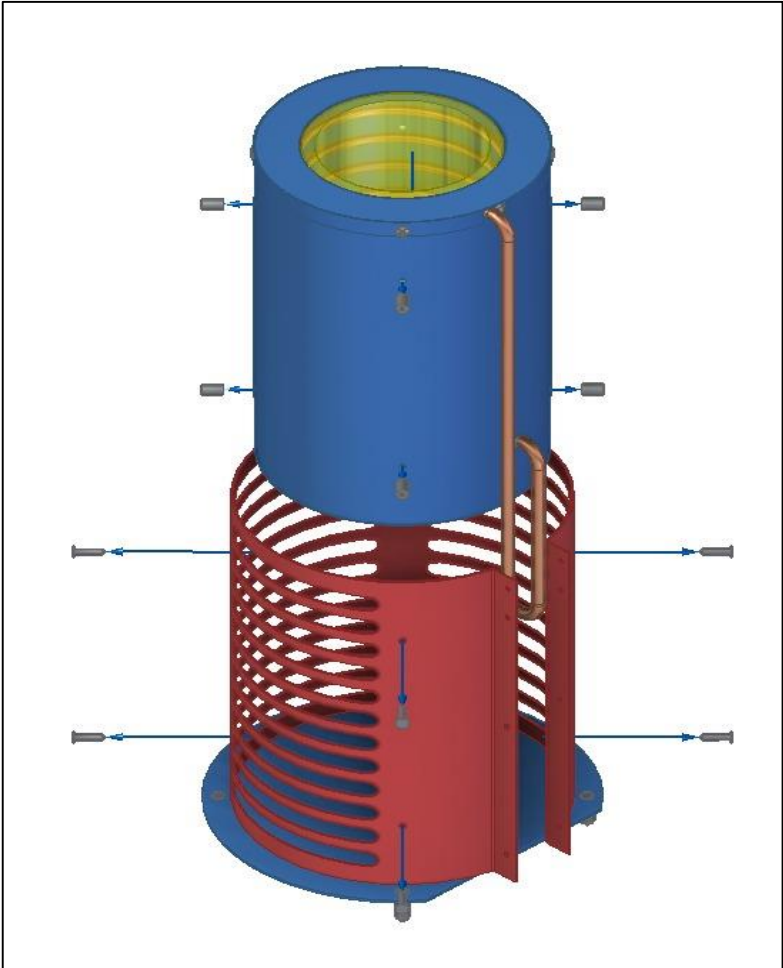
Imagen 47. Acople de la tapa exterior



Fuente: elaboración propia

Para realizar el ensamble de la malla de seguridad a la cual va unida la lámina base tenga en cuenta que va ensamblada con 6 tornillos M4 de 15mm acoplados a los bujes separadores como se muestra en la imagen 48.

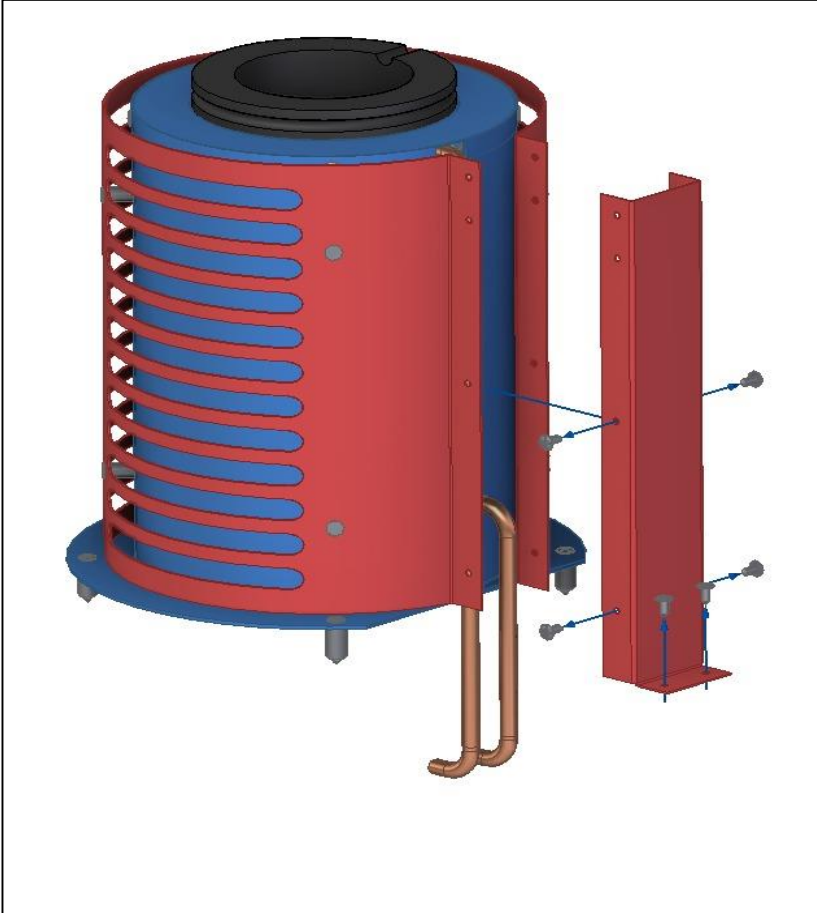
Imagen 48. Instalación malla de seguridad



Fuente: elaboración propia

Instalada la maya de seguridad se procede a instalar la tapa malla que su función es cubrir la conexión de la bobina con la fuente de poder, va ensamblada con 6 tornillos M4 de 10mm como se observa en la imagen 49

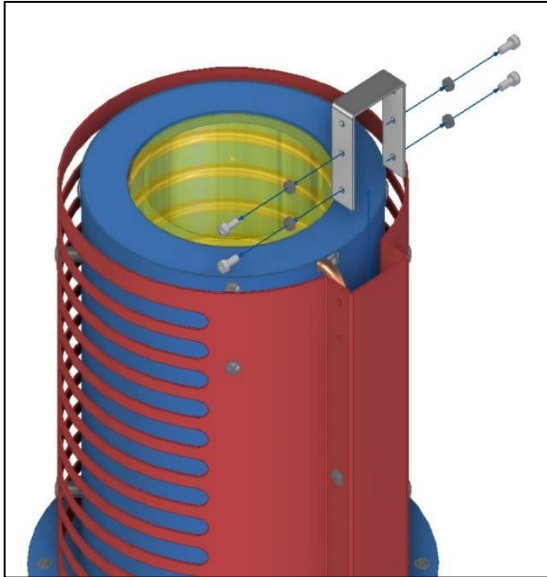
Imagen 49. Acople tapa malla



Fuente: elaboración propia

Para el ensamble de la tapa superior se debe hacer el empalme de la Platina pivote tapa con la tapa malla se atornillan 4 tornillos Allen M4 de 10 mm colocados en la parte exterior y unidos a cuatro tuercas como se muestra en la imagen 50

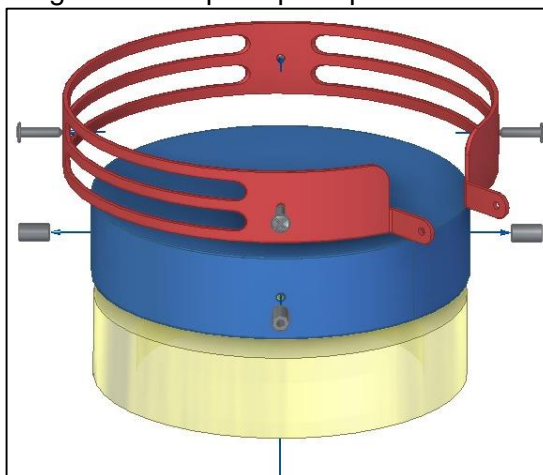
Imagen 50. Ensamble platina pivote tapa



Fuente: elaboración propia

Para hacer el ensamblaje de los componentes de la tapa superior, se debe insertar el cemento refractario tapa dentro del recubrimiento de la tapa, una vez dentro coloque la malla de seguridad de la tapa y apriete los tornillos para asegurar las piezas. Son 4 tornillos M4 de 25mm acoplados a los bujes separadores como se muestra en la imagen 51

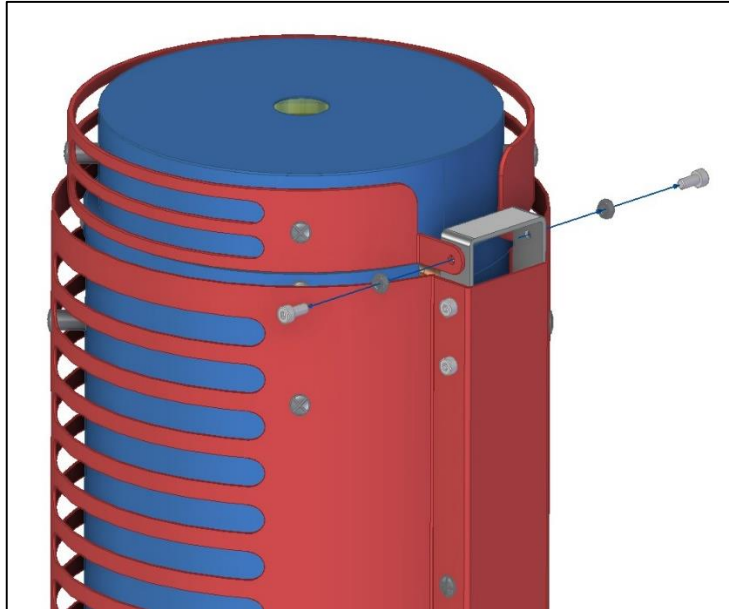
Imagen 51. Acople tapa superior



Fuente: elaboración propia

Una la tapa superior con la platina pivote tapa, se atornillan 2 tornillos Allen M4 de 10 mm colocados en la parte exterior y unidos a 2 tuercas como se muestra en la imagen 52

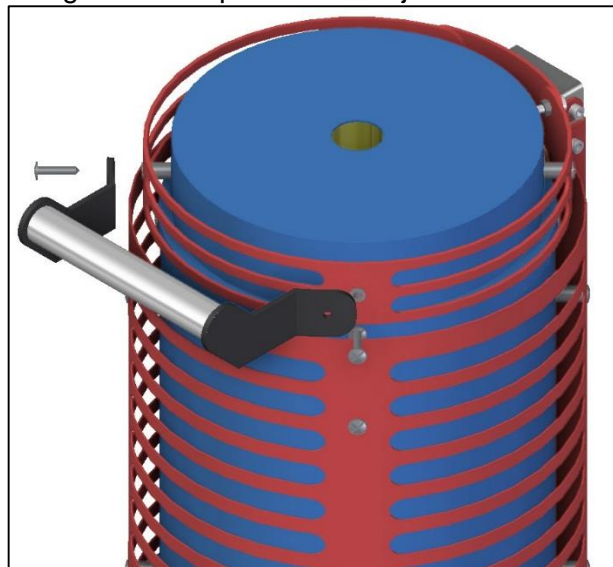
Imagen 52. Acople tapa superior



Fuente: elaboración propia

Instale la manija en la tapa superior colocando 2 tornillos M4 de 10mm como se observa en la imagen 53

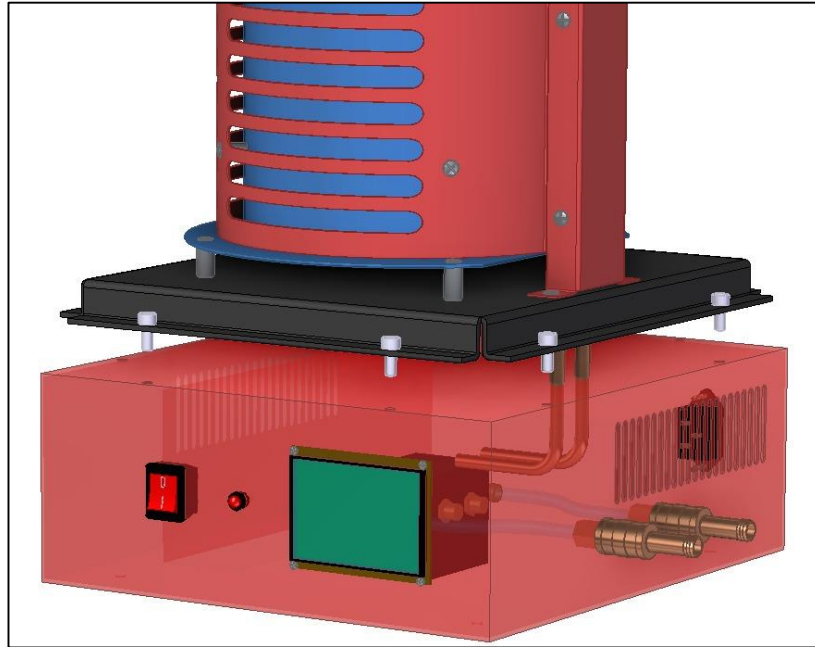
Imagen 53. Acople de la manija



Fuente: elaboración propia

Una la instalación del Busbar con la conexión de la bobina, para ello se debe destapar la fuente de poder ingrese por la abertura superior de la tapa los tubos de la bobina y únalos a la conexión de la caja negra que se encuentra dentro de la fuente de poder y cierre la fuente de poder. Como se visualiza en la imagen 54

Imagen 54. Conexión de la bobina con la fuente de poder



Fuente: elaboración propia

El horno se colocará sobre una mesa de montaje, que permitirá que el estudiante pueda sacar el crisol con facilidad y sujetara la base del horno para darle una mayor estabilidad. Coloque el horno de inducción sobre la mesa estructural como se observa en la imagen 55.

Imagen 55. Montaje mesa estructura



Fuente: elaboración propia

5.2 MANUAL DE OPERACIÓN

En este manual se describen los pasos que se deben realizar para el óptimo funcionamiento del horno, de esta manera se garantiza que el proceso se lleve a cabo sin presentar accidentes o fallas graves, se aconseja que durante la operación del horno el estudiante siempre este supervisado por personal capacitado para esta labor, ya que, entra a jugar la integridad de los estudiantes.

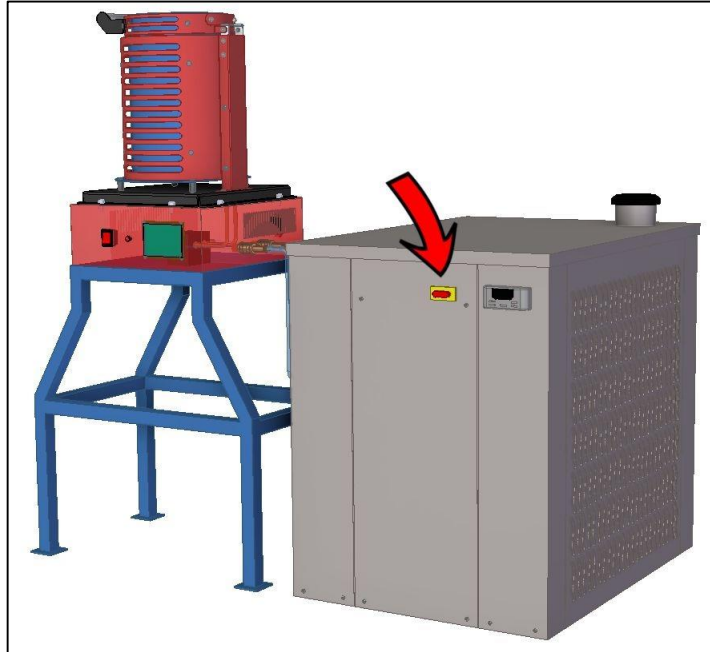
Otro punto a tener en cuenta son las normas de seguridad que se deben cumplir en su totalidad para el manejo de altas temperaturas, lo suficiente para causar grandes daños a la integridad física de los estudiantes y demás participantes presentes en cada laboratorio.

Antes de encender el equipo por favor revisar que el convertidor, el horno, y el sistema de enfriamiento se encuentre conectados correctamente, tenga en cuenta que tocar el horno de inducción sin verificar el suministro de energía es peligroso si presenta fallas en la conexión eléctrica.

Recuerde que el material que ingrese al horno no debe tener humedad alguna, la forma del aluminio no debe tener figuras encerradas por ejemplo un tubo ya que el aire que se acumula en espacio cerrado se dilata y puede generar una explosión.

PRIMERO: Encender el chiller programando el flujo de agua, la temperatura del refrigerante y la conductividad del agua como lo indique su manual de operaciones de este, se debe tener en cuenta que el botón de color rojo que señala la flecha en la imagen 56 es el de encendido.

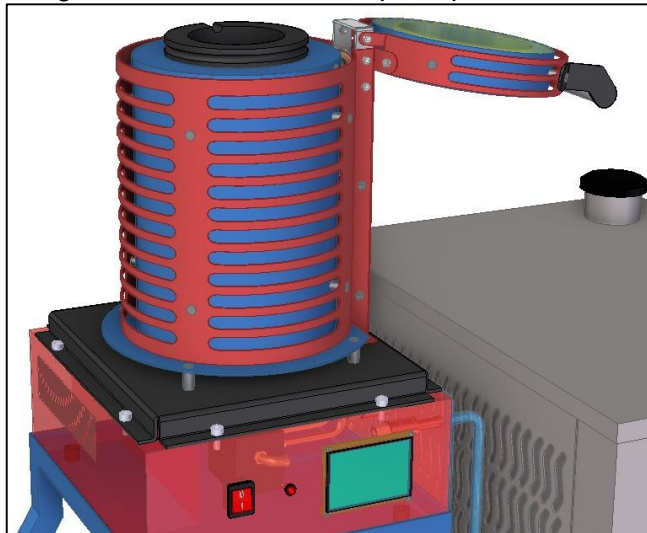
Imagen 56. Encendido del chiller



Fuente: elaboración propia

SEGUNDO: Abra la puerta de manera segura sosteniéndola de la manija con los guantes de protección, como se muestra en la imagen 57

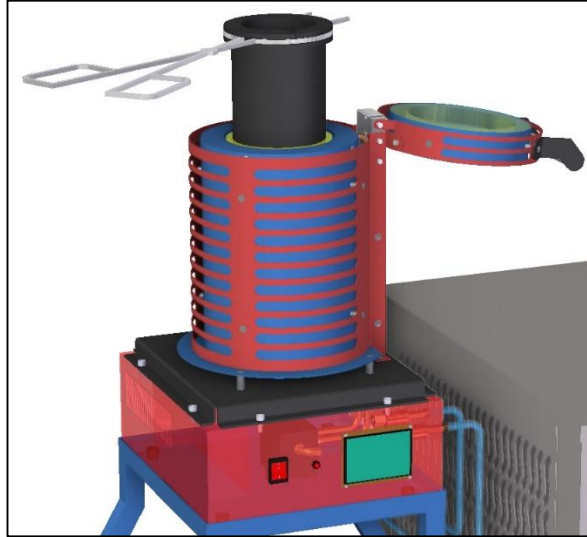
Imagen 57. Abertura de la tapa superior



Fuente: elaboración propia

Realice la extracción del crisol como se muestra en la imagen 58 para realizar la carga del material



Imagen 58. Extracción del crisol



Fuente: elaboración propia

Para realizar la carga del material se debe tener en cuenta las recomendaciones del cuadro 1, para que el crisol no vaya a presentar fallas.

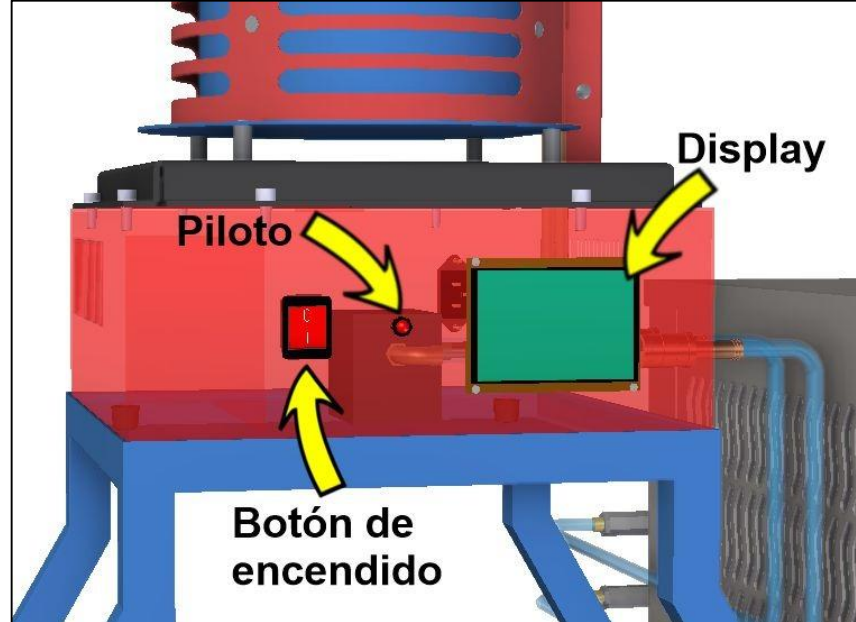
Cuadro 1. Proceso de carga en el crisol

CARGA	
<p>1) Carga de material:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La carga debe ser colocada de forma que esta quede suelta en el crisol. • Colocar preferentemente las piezas más pequeñas y el material a granel en el fondo del crisol para que actúen como colchón a los lingotes grandes (ver a y b) • Colocar los lingotes verticalmente dentro del crisol y asegurarse que haya espacio adecuado entre los lingotes y la pared del crisol (ver c y d). 	 <p>Formas de colocación de la carga en el crisol. (a) Incorrecta, (b) correcta, (c) forma correcta de colocación de los lingotes de manera vertical y (d) no se debe sobre sobrellenar el crisol.</p>
CARGA	
<p>2) Al recargar, debe dejarse un remanente de metal líquido en el crisol para permitir una fusión rápida.</p> <p>Evitar cargar lingotes grandes y en gran cantidad si el crisol tiene una pequeña cantidad de metal líquido. Esto causara la solidificación del metal, causando un agrietamiento inmediato del crisol.</p>	 <p>Evitar cargar gran cantidad de lingotes dentro del crisol.</p>

Fuente: Roberto Orellana Guía de operación del crisol. [citado: septiembre del 2014]
 Disponible en: <http://ri1.ues.edu.sv>

TERCERO: Una vez ingresado el Crisol con la carga, se cierra la tapa asegurándose que no presente fugas. Pulse el botón rojo de encendido, programe el tiempo de operación y la temperatura por medio del display como se visualiza en la imagen 64

Imagen 59. Panel principal de la fuente de poder



Fuente: elaboración propia

QUINTO: Esté atento a el piloto ya que se encenderá una vez trascurrido el tiempo de fundición, pulse el botón de encendido para apagar el horno.

SEXTO: De igual manera a la imagen45 extraiga el material de forma segura para vértelo sobre un molde, cavidad, o dispositivo determinado.

SEPTIMO: Apague el chiller, realizar la limpieza del horno con el fin de evitar la acumulación de escoria en el crisol, evitar la acumulación de polvo y dejar el sitio de trabajo ordenado.

Adicional para el buen uso del horno se tiene las siguientes recomendaciones:

Tenga en cuenta que para realizar el proceso anterior se debe contar con el manual de seguridad.

5.3 MANUAL DE MANTENIMIENTO.

Para garantizar la vida útil del horno de inducción es necesario realizar una rutina de mantenimiento, dado que se requiere garantizar el adecuado funcionamiento del equipo cada vez que se opere. Teniendo en cuenta 2 ciclos de trabajo que constan de 4 horas de practica divididos en dos grupos de laboratorio.

5.3.1 Rutina No. 1. El mantenimiento visual se realizará antes de iniciar el proceso y la limpieza del crisol al finalizar cada ciclo de trabajo teniendo en cuenta las siguientes actividades:

- Inspeccionar el cableado eléctrico en busca de aislantes gastados, terminales rotas y conexiones defectuosas.
- Revisar el chiller en busca de fugas en las conexiones y las mangueras.

5.3.2 Rutina No. 2. Las siguientes actividades de mantenimiento se deben realizar cada mes o 8 ciclos de trabajo lo que primero ocurra:

- Revisión y atornillado general del horno de inducción.
- Observación visual de grietas y fracturas en el crisol y parte exterior del horno.

5.3.3 Rutina No.3. Las siguientes actividades de mantenimiento se deben realizar cada año o 64 ciclos de trabajo:

- Desatornilla la tapa de recubrimiento exterior para observación visual de los recubrimientos cerámicos y la bobina. Limpieza de los componentes internos, se recomienda que el equipo se encuentre desconectado de la fuente eléctrica.
- Desmontaje de la bobina para verificación de que no haya fugas ni grieta.
- Las instrucciones deben ser atendidas de acuerdo a la sección de cuidados y precauciones eléctricas. De otra manera puede haber riesgos físicos y personales.

El horno de inducción debe ser controlado mediante un checklist que determina los ciclos y las actividades a realizar como se observa en el cuadro 2

Cuadro 2. Actividades de mantenimiento Correctivo

Componente	Actividad	Rutinas		
		No. 1	No. 2	No. 3
Crisol	Inspección visual del estado físico	X		
	Limpieza interna	X		
	Limpieza externa	X		
Bobina	Apriete de tornillería		X	
	Desmontaje del núcleo			X
Cerámico y cemento refractario	Inspección visual del estado físico	X		
	Limpieza interna	X		
	Limpieza externa		X	
Carcasa	Apriete de tornillería	X		
	Golpes, rapaduras	X		

Fuente: elaboración propia.

5.3.2 El mantenimiento diario del equipo. Limpie el polvo en la cubierta y el equipo del convertidor, revisar que las tuercas y tornillos se encuentre atornillados, verifique que no haya fugas en las mangueras, válvulas y acoples del equipo. Realizar una inspección visual, para percibir grietas o desportillado en alguna parte, pero principalmente al crisol.

5.3.3 Mantenimiento semanal. Limpie cuidadosamente los circuitos eléctricos del horno y el convertidor si hay presencia de mugre o desechos, para esto se sugiere usar una aspiradora en vez de una sopladora ya que el calor del aire puede dañar algunos dispositivos internos que no podemos ver.

Revisar las conexiones eléctricas entre el convertidor y el horno, si observa que hay alguna parte suelta, es necesario cambiarla, lleve un reporte del revestimiento del horno debe observar que no se presente ninguna fisura.

Controle el agua que circula por fuera del circuito, Si no es suficiente agréguele lo necesario y revise si hay alguna fuga que pueda causar esta insuficiencia. Controle la limpieza del tanque.

Limpie los filtros del agua, así como la suciedad que se reúne en el piso de la torre. Algunos químicos pueden ser usados para prevenir el agua externa de musgo. Una mejor calidad del agua la puede proveer una maquina anticalcificante.

5.3.4 Mantenimiento mensual. Los tornillos que sostienen el bobinado deben estar bien apretados. Revise si hay alguna fuga en los cables de entrada con agua refrigerada del sistema a la entrada del horno, si la hay revise y apreté las conexiones.

5.3.5 Mantenimiento anual. Revise y controle todas las conexiones eléctricas e hidráulicas. Limpie el lugar alrededor de todas las mangueras, resuelva los daños o conexiones sueltas que puedan causar alguna fuga en el agua. Limpie las salidas de aire de la torre de refrigeración.

5.4 MANUAL DE SEGURIDAD

Equipo de protección primario que incluye lentes de seguridad, careta, casco, protección que se deben fabricar de telas de vidrio armonizadas, la cual protege la piel de quemaduras ya que la fibra se derrite sin prender fuego permitiendo retirarlo en caso de salpicadura del material fundido. Como se observa en la imagen 60:

Imagen 60. Equipo de protección



Fuente: INDUCTOTHERM CORP. [citado:3 de junio de 2018]. Disponible en:
<https://inductotherm.com/>

6 GUÍA DE LABORATORIO

 Fundación Universidad de América	FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA	Código: FO-10-PR-EF-019
	FACULTAD DE INGENIERIAS	Versión 1
	GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	Junio 2019

PROGRAMA: Ingeniería Mecánica	DEPARTAMENTO: Ingeniería aplicada
NOMBRE ASIGNATURA: Tratamiento Térmicos	CODIGO:
PRÁCTICA No. 1	NOMBRE DE LA PRÁCTICA: Practica de fundición

1	INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO:
<p>La Fundición es un proceso de manufactura muy empleado en las industrias, ya que se encarga de llevar los metales hasta el punto de fusión, para la formación de piezas complejas que dependen del molde. El conocimiento de este proceso permitirá a los estudiantes el tomar decisiones técnicas a la hora de diseñar productos o dirigir operaciones que involucren los procesos de fundición.</p> <p>Los hornos por inducción poseen ciertas ventajas y limitaciones las cuales los hacen únicos y eficientes. Entre las ventajas más relevantes están:</p> <ul style="list-style-type: none"> •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 calentamiento. <p>Los procesos de fundición se pueden clasificar según el tipo de molde que utilicen: moldes permanentes o moldes desechables. Los procesos de molde desechable implican que para sacar la pieza fundida se debe destruir el molde que la contiene, haciendo de este un proceso con velocidades de producción bajas. Gran parte del tiempo de fabricación se destina a realizar el molde y el tiempo de fundición es relativamente bajo en comparación con el de moldeo. En los procesos de fundición en molde permanente, el molde este fabricado en un material duro como el metal o la cerámica que permite usarlo repetidas veces; el poder reutilizar el molde permite que el tiempo de producción sea más bajo que en los procesos de molde desechable.</p> <p>Los hornos de crisol trabajan por combustión de un elemento como el gas el cual calienta el crisol que contiene el material a fundir. También puede ser calentado usando energía eléctrica: horno de inducción. El crisol se apoya sobre la peana que está hecha también en material refractario y le da la posición necesaria con respecto a la salida del gas. Para lograr concentrar el calor alrededor del crisol esté contenido entre unas</p>	

paredes refractarias que generan una cavidad para el flujo de los gases de combustión. Existen hornos con crisol móvil o con crisol fijo. La diferencia entre estos es que el crisol móvil al fundir el metal se levanta y sirve como cuchara de colada. Los hornos de crisol fijo se deben cucharear para realizar la fundición. En el laboratorio se cuenta con un horno de crisol extraíble.

Recuerde que el diseño de este horno es para un material específico que es aluminio, tenga en cuenta siempre el manual de operación del equipo. Para evitar lesiones y/o fallas en la maquinaria e implementos de apoyo, causados durante la realización de la práctica, es necesario que los estudiantes al momento de realizarla tengan en cuenta:

1. Es importante portar los elementos de seguridad necesarios: guantes de asbesto o carnaza largos para proteger los brazos, overol, gafas de seguridad, careta, botas de seguridad y peto.
2. Riesgos relacionados con el manejo del horno eléctrico: Utilizar los elementos de protección para temperatura, evitar cualquier contacto con los terminales eléctricos de las resistencias del horno o cualquiera de sus partes. Durante el proceso de fundición del metal mantener el crisol en una posición estable para evitar derramar metal sobre las resistencias del horno.
3. Riesgos relacionados con metal fundido: La temperatura para fundir el aluminio es de 660 grados, por lo que el metal fundido deberá manipularse con mucho cuidado evitando derramar el material; al preparar la arena se deberá controlar la humedad para evitar que al verter el metal fundido se generen borboteos fuera del molde que puedan quemar al operario; evitar inhalar los vapores emanados durante el proceso de fundición.

2 | OBJETIVO(S):

El objetivo fundamental es fomentar la enseñanza activa y participativa, de los estudiantes de ingeniería, permitiéndole realizar una fundición de aluminio impulsando el método científico y la innovación a partir de la tecnología.

Los objetivos que persigue la correcta realización de esta práctica son:

- Conocer las normas de seguridad que se deben tener en cuenta al realizar procedimientos de fundición
- Encontrar la importancia de la fundición como proceso de manufactura en la industria.
- Identificar cada uno de los pasos para llevar a cabo una fundición.
- Identificar los elementos de una mezcladora.
- Conocer el funcionamiento de un horno eléctrico y de un horno gas, sus diferencias y ventajas frente al proceso de fundición.
- Identificar las herramientas manuales requeridas en un proceso de fundición.

3 EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y/O MATERIALES:

Este equipo tiene un requerimiento de uso el cual exige ciertas normas que garantizaran su protección física, por lo que es OBLIGATORIO el uso constante de equipo de protección durante la práctica. 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.



- 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.



- 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.



•Las pinzas de crisoles, son instrumentos de 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.

4 | MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS:

El estudiante elaborará una pieza mediante el proceso de fundición en esta práctica se fundirá aluminio ya que es un metal fácil de fundir, encontrar y hace parte de la especificación del equipo.

Se deberán tomar las precauciones indicadas en el laboratorio de tratamientos térmicos para evitar cualquier tipo de incidente, de igual forma se usará el equipo de seguridad necesario.

PROCEDIMIENTO DE SEGURIDAD:

- Antes de comenzar a usar el horno este tiene que estar desconectado para evitar cualquier tipo de accidente.
- Todo tipo de trabajo realizado con el horno tiene que ser llevado a cabo por personal autorizado.
- Para evitar cualquier tipo de incidente: revisar las fisuras tanto las del horno como las de las conexiones que este pueda tener

Realice los siguientes pasos para la puesta en marcha del equipo.

PRIMER PASO, Encienda el chiller y prográmelo como lo indica el manual de uso. Revisar que el horno se encuentre totalmente apagado, asegurarse que el horno esté libre de temperaturas mayores a 40°, si se cumple con lo anterior proceda a abrir el horno para extraer el crisol y facilitar la colocación del material en su interior.

SEGUNDO PASO, Introduzca el crisol con la carga dentro del horno, cierre la tapa superior y proceder a encenderlo, debe subir la temperatura y coloque el tiempo del proceso manipulando el tablero de control, para garantizar el buen funcionamiento.

TERCER PASO, Transcurridos 15 minutos se encenderá el piloto, 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.

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 con las pinzas, asegurándose de no tener contacto con el crisol debido a su alta temperatura.

QUINTO PASO, Vierta el material en su respectivo molde, deje que el horno llegue a temperatura ambiente y proceda a apagar el chiller

Resolver las siguientes preguntas

1. ¿Qué tipo de molde se utilizó para el vertido del material?
2. ¿A qué temperatura se encontraba el material fundido una vez terminado el vaciado?
3. ¿A qué velocidad se realizó el vaciado y cuánto tiempo tarda en solidificarse la pieza?
4. ¿Realizar un esquema de procesos, indicando cada uno de los pasos que se debieron seguir en el laboratorio para obtener el producto final?
5. ¿Cómo el horno convierte la energía eléctrica en calor para que la pieza de aluminio se funda?
6. ¿Qué ocurriría al disminuir la carga de fundición?
7. ¿Por qué es útil conocer el proceso de fundición?

5 | CÁLCULOS Y RESULTADOS:

Deben realizarse la respectiva operación de carga y descarga del material y luego realizar un informe de desarrollo de la guía con los resultados obtenidos del material fundido y explicación del funcionamiento, operación y métodos utilizados en todo el proceso de fundición.

6 | ANEXOS:

Para el correcto proceso de funcionamiento del horno recuerde tener en cuenta todos los manuales de operación

7	REFERENCIAS:
<ul style="list-style-type: none"> • HTTP://OSTOPACK.COM/OSTOPA CK/25-GUANTE-ALUMINIZADO-JUTEC.HTML. • https://code.inductotherm.com/06%20Resources/Safety/M2573%20Rev%202.pdf. • Fundación, Facultad ingeniera industrial de la escuela de ingenieros Julio Garavito 	

	Elaboró	Revisó	Autorizó
Cargo		<i>Director de Programa o Coordinador de Área</i>	<i>Decanatura o Dirección Ciencias</i>
Nombre			
Firma			

Fuente: elaboración propia

7 ANALISIS AMBIENTAL

Partiendo que en Colombia el ministerio del medio ambiente basado en la resolución 619 del 7 de julio de 1997 artículo 5 de la ley 99 de 1993 y el artículo 73 del decreto 948 de 1995³² establece el reglamento de protección y control de los recursos naturales a partir de los cuales se requiere solicitar un permiso para general emisión atmosférica en la industria de operación de hornos.

La tecnología de los hornos de inducción sugiere que son más amigables con el medio ambiente por que no requieren de combustibles para proceder con la fundición, pero esto no solo depende del horno sino también de los componentes que tenga la carga a fundir. Este proceso de fundición tiene una relación con los siguientes factores ambientales;

- Emisiones a la atmosfera
- Residuos solidos
- Aguas residuales
- Ruido

7.1 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 hace una relación entre los métodos de fundición para determinar la contaminación en general del proceso de fundición en Colombia

Tabla 20. Factores de emisión de material particulado

Tipo de horno	Sistema de control	Factor de emisión [kg/ton Al fund.]
<i>Cubilote</i>	Sin control	6.9
	Torre de Lavado	1.6
	Lavador Venturi	1.5
	Precipitador electrostático	0.7
	Caja de filtros de mangas	0.3
	Captador húmedo simple	4.0
	Lavador de choque	2.5
	Lavador de alta energía	0.4
<i>Arco eléctrico</i>	Sin control	6.3
	Caja de Filtros de mangas	0.2
<i>Inducción eléctrica</i>	Sin control	0.5
	Caja de filtros de mangas	0.1
<i>Crisol</i>	Sin control	1.1
	Caja de filtros de mangas	0.1

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)

Fuente: IEPF SAS. [citado:3 de junio de 2018]. Disponible en: <http://www.iepfsas.com/>

³² IEPF SAS. Normatividad ambiental que rigüe el proceso de fundición. [Citado: 23 de noviembre de 2018] Bogotá D.C

A diferencia de las otras tecnologías de fundición el horno de inducción tiene una mínima emisión de partículas, siendo parte de una solución ambiental en los procesos de fundición. Por seguridad el laboratorio deberá implementar una campana extractora, debido a que, si el material de carga trae pintura, podría generar gases contaminantes.

En los residuos sólidos se obtendrá escoria, polvos y residuos refractarios, la escoria depende de la calidad de la carga, por eso es importante conocer su composición ya que los residuos de plomo, cadmio o cromo son peligrosos y normalmente se encuentran en metales no ferrosos como lo es el aluminio. Los polvos provienen de los equipos de control en las que se funden metales no ferrosos, este polvo debe ser recirculado por dos razones, una para hacer recuperación de metales y la otra porque si se acumula genera fallos en el equipo.

El agua residual se genera en el sistema de refrigeración ya que esta agua se debe cambiar, y posee contaminación proveniente del proceso por lo que deberían ir a un sistema de tratamiento de agua

La contaminación auditiva dependerá de la frecuencia de trabajo, pero en este caso no aplica a diferencia de los otros procesos.

Tabla 21. Niveles de ruido

Tipo de horno	Ruido máximo (Interior)	Ruido medio (Interior)
Cubilote	67 - 70	63 - 67
Inducción	nd	nd
Arco	100	70
Crisol	89	77

Fuente: Estudio de factibilidad en control de la contaminación, BKH 1992.

La manera en que el ruido generado se propaga hacia el exterior dependerá exclusivamente de las instalaciones de la empresa.

Fuente: IEPF SAS. [citado:3 de junio de 2018]. Disponible en: <http://www.iepfsas.com>

Al trabajar con los hornos de inducción se obtiene una solución ambiental que mejora el proceso debido al ahorro en el consumo de ferroaleaciones y la generación de gases contaminantes no aplica en este proceso al no tener combustibles en el momento de la fundición.

Para empezar el análisis ambiental nos basamos en la información anterior y se realiza una tabla donde se describe lo aspectos que afectaran el medio ambiente.

Tabla 22. Daños ocasionado a través del proceso

FACTOR AMBIENTAL	POSIBLES DAÑOS AMBIENTAL
Suelo	➤ Posibles derrames
	➤ Afectación en la zona donde ira ubicado
	➤ Desechos sólidos de material de carga
Agua	➤ Posibles derrames
	➤ Vertimientos en desagües
	➤ Desperdicios
	➤ Proceso de soldadura
Aire	➤ Gases a la atmosfera
	➤ Contaminación auditiva en fabricación
	➤ Contaminación auditiva en operación
	➤ Proceso de soldadura

Fuente: elaboración propia

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 Contaminación baja.
- 2-3 Contaminación media.
- Contaminación alta.
- N/A si no tiene riesgo.

7.2 EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL.

Se realiza una tabla de donde se evalúa el riesgo al medio ambiente en la fabricación y operación del horno con los criterios anterior mente nombrada.

Tabla 23. Evaluación del impacto ambiental

Impacto ambiental	Proceso	
	Fabricación	Operación
Posibles derrames en el suelo	1	5
Afectación en la zona donde ira ubicado	N/A	3
Desechos sólidos de material de carga	N/A	1
Vertimientos en desagües	3	4
Desperdicios	3	3
Pintura en la fabricación	3	N/A
Gases a la atmosfera	3	1
Contaminación auditiva en operación	N/A	1
Total	13	18

Fuente: elaboración propia

La evaluación determina que el horno de inducción tiene un riesgo medio, si no se tiene cuidado en su operación el riesgo puede aumentar, por lo que se debe buscar soluciones que logren disminuir aún más el impacto que conlleva el riesgo del material.

8. EVALUACIÓN 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.

8.1 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 24. Costo del desarrollo del horno

Costo desarrollo del diseño (Talento Humano)			
DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDADES	PRECIO (COP)
Tutoría con el orientador del proyecto	60	HORA	\$ 1.200.000
Proponentes	3000	HORA	\$ 21.000.000
TOTAL			\$ 22.200.000

Fuente. elaboración propia.

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

Tabla 25. Costo de materia prima del diseño de un horno por inducción

COMPONENTES	CANTIDAD	UNIDADES	PRECIO (COP)
Crisol + Cerámico	1	UN	\$ 150.000
Base de crisol	1	UN	\$ 50.000
Refractario del crisol	1	UN	\$ 150.000
Bobina	1	UN	\$ 1.500.000
Refractario externo	1	UN	\$ 550.000
carcasa metálica cuadrada	1	UN	\$ 750.000
carcasa metálica cilíndrica	1	UN	\$ 700.000
aislante térmico de tapa	1	UN	\$ 100.000
Fuente de poder	1	UN	\$ 9.200.000
display	1	UN	\$ 500.000
transformador	1	UN	\$ 2.500.000
Tapa superior	1	UN	\$ 230.000
soporte de la tapa	1	UN	\$ 57.000
Busbar	1	UN	\$ 4.000.000
Panel de control	1	UN	\$ 1.800.000
Botón ON	1	UN	\$ 5.000
Botón OFF	1	UN	\$ 5.000
Base de unión	1	UN	\$ 525.000
Sistema de refrigeración independiente	1	UN	\$ 23.000.000
Mangueras de conexión	4	UN	\$ 219.600
Pinzas sujetadoras	1	UN	\$ 150.000
Total			\$ 46.141.600

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 26.

Tabla 26. Costo Mano de Obra

Costo mano de Obra para la fabricacion de un horno por inducción			
DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDADES	PRECIO (COP)
Fabricación de un horno por inducción	2	DIAS	\$ 20.000.000
Instalacion del horno por induccion	4	DIAS	\$ 10.000.000
TOTAL			\$ 30.000.000

Fuente.elaboracion 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 27

Tabla 27. Costo Total del Proyecto

Costo Total del Proyecto		
ITEM	DESCRIPCION	PRECIO (COP)
1	Costo desarrollo del diseño (Talento Humano)	\$ 22.200.000
2	Costo de Materia Prima del Diseño de un Horno de Inducción	\$ 46.141.600
3	Costo mano de Obra para la Fabricacion de un Horno de induccion	\$ 30.000.000
TOTAL		\$ 98.141.600

Fuente: elaboracion propia

8.2 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. Ver Anexo 6.

Imagen 61. Cotización Horno por inducción IEPF S.A.S

	\$ 68.500.000		SUBTOTAL
	\$ 2.055.000	3%	DESCUENTO
	\$ 66.445.000		TOTAL
FORMA DE PAGO	\$ 33.222.500	50%	ORDEN DE COMPRA
	\$ 16.611.250	25%	A DOCUMENTOS EN ZONA FRANCA O DEPOSITO HABILITADO
	\$ 16.611.250	25%	8 DIAS DESPUES DE INSTALADO

Fuente:elaboracion propia, basada en: costos del mercado de IEPF SAS

La evaluacion financiera realizada en este proyecto nos determina que la elaboracion de un solo horno de induccion para el laboratorio de la universidad America, estaria por fuera de competicion con los hornos de induccion que existen en el mercado.

Debido a que el costo de elaboracion es mayor al costo comercial de los que ya existen en el mercado.

9. CONCLUSIONES

- Se determinó que uno de los principales inconvenientes, de la evaluación teórica fue la ausencia de equipos, especializados, para tales propósitos, ya que, en Colombia, se encuentra empresas encargada de armas los hornos que se importan, mas no se diseñan los componentes.
- Según el estudio de los hornos de inducción y teniendo en cuenta las características diferenciadoras de los hornos por operación, se clasifican en los hornos con mayor eficiencia, pues disminuyen el tiempo de fundición gracias al proceso que realizan.
- Se determinó que la seguridad es un factor importante para el laboratorio de la universidad, por eso es viable diseñar un cajón de seguridad que permitirá realizar el proceso de forma automática para que el estudiante no tenga contacto con el material fundido, pero podrá observar de manera segura todo el proceso y operar el horno sin tener contacto directo, para esto la alternativa dos sería viables si se ubica en otro lugar de trabajo
- Se determinó por medio de la recopilación de información que el elemento principal para que el horno funcione correctamente es la bobina, encargada de general el campo electromagnético que permite la fundición homogénea de la pieza
- De acuerdo con los cálculos de la bobina, la corriente de entrada es mucho menor a la corriente de trabajo por lo que se vuelve necesario un equipo que la incremente y que tenga un variador de frecuencia
- De acuerdo a la investigación y cálculos de diseño se pudo identificar las variables de proceso que involucran la fundición aluminio, ya que se deben tener en cuantas sus propiedades físicas como eléctricas.
- Se elaboró una guía de prácticas de laboratorio, un manual de funcionamiento, mantenimiento y seguridad del horno de fundición de materiales no ferrosos para el adecuado uso por parte de los estudiantes que utilizan el laboratorio de tratamientos térmicos.
- Los manuales del equipo que se realizaron en este trabajo, permitirán la construcción, operación y mantenimiento de horno, si se siguen las instrucciones al pie de la letra, de lo contrario se puede generar una falla en el momento de operarlo.
- 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.

- En definitiva, hacer el horno no es viable. Debido a que realizarlo tendría un costo de 99.000.000 millones aproximadamente, mientras que su valor comercial es de 69.000.000 millones. Teniendo en cuenta que el comercial funde cualquier tipo de material y el del proyecto está restringido para aluminio, sería una mala inversión. El dinero adicional se puede utilizar para automatizar o mejorar la seguridad del horno hacia el estudiante.

10.RECOMENDACIONES

- Para el funcionamiento de cualquier horno de inducción, el operario a cargo debe saber manejar correctamente el equipo, regular el consumo de energía y el tiempo de operación.
- Debe tener en cuenta que el manejo de un horno de induccion implica riesgos fisicos si no se tiene en cuenta las recomendaciones de operación, se recomienda el uso obligatorio de todos los elementos de proteccion.
- Se recomienda utilizar equipo de protección y seguridad industrial básicos para trabajar en fundición de materiales no ferrosos como son gafas, guantes de cuero y guantes de amianto.
- Se recomienda tener cerca de este equipo un extintor de incendios.
- Para la operación del horno es necesario seguir la secuencia descrita en el manual de funcionamiento del horno.
- Por último, se recomienda reconsiderar la alternativa de un horno basculante con cajo de protección, y para varias alecciones no férreas. Es probable que esta alternativa resulte un poco más competitiva con las opciones que hay en el mercado.

BIBLIOGRAFIA

ALFREDO, A. (noviembre de 2007). Metodología para la construcción de un horno de inducción electromagnética. Obtenido de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2007/125275.pdf>

AMBRELL. (2018). "Acerca de inducción calentamiento". {En línea}. {15 de febrero de 2018} Recuperado el 18 de 09 de 2018, Obtenido de <https://www.ambrell.com>: <https://www.ambrell.com>

CHAPMAN, S. J. (S.F.). Campo Magnético. En S. J. Chapman, Máquinas eléctricas (pág. 8). Bogotá: MC Graw Hill.

CALLISTER, William D., Introducción a la ciencia e Ingeniería de los materiales. Ed. Reverté S. A, España 1995.

FOSSATI. (2011). Crisoles > Crisoles para hornos a inducción > Cilíndricos – Grafito con borde. Obtenido de Crisoles > Crisoles para hornos a inducción > Cilíndricos – Grafito con borde. Obtenido de: http://www.fossati.com/Cilindricos--Grafito-con-borde_19_1_3.html

JESUS, C. R., & ELISEO, Z. D. (Diciembre de 2013). instituto politecnico nacional. Obtenido de análisis de la resonancia eléctrica en fundición de hornos de inducción de materiales. Obtenido de: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/13891/AN%C3%81LISIS%20DE%20LA%20RESONANCIA%20EL%C3%89CTRICA%20EN%20LA%20FUNDICI%C3%93N%20DE%20HORNOS%20DE%20INDUCCI%C3%93N%20DE%20MATERIALES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

JULIO ASTIGARRAGA URQUIZA. Hornos industriales de inducción. Edición especial Santafé de Bogotá editorial Nomos S.A.1999.

YUNUS A. CENGEL, JHON M. CIMBA. A, Mecánicas de fluidos fundamentos y aplicaciones, Capítulo 5, conservación de masa y energía.

CASTAÑO, ENRIQUE (18/07/2016). Los cambios de estado: gráficas de calentamiento y enfriamiento Obtenido de: <https://lidiakonlaquimica.wordpress.com/2016/07/18/los-cambios-de-estado-graficas-de-calentamiento-y-enfriamiento/>

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

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

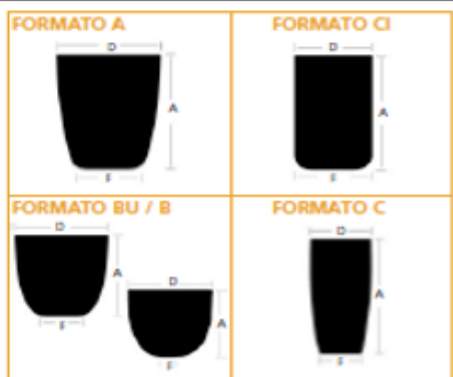
TP LABORATORIO QUÍMICO. "Pinza de crisol". {En línea}. {01 septiembre de 2018}. Disponible en:<https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/materiales-e-instrumentos-de-un-laboratorio-quimico/pinza-de-crisol.html>

PEREZ PINO Fredy y SOTO Enrique. Diseño, cálculo y construcción de un horno de fundición de aluminio tipo basculante y sus moldes. Universidad de Pamplona facultad de ingenierías y arquitectura departamento de ingeniería mecánica. Pamplona 2009. Disponible: <https://es.slideshare.net/JorgeCastilloCobea/horno-basculante>

ANEXOS

**ANEXO A.
CATÁLOGO DE SELECCIÓN POR VOLUMEN DEL CRISOL**

FORMATO A					FORMATO CI				
Capacidade aprox.					Capacidade aprox.				
Referencia	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Fundo (mm)	Vol. (L)	Referencia	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Fundo (mm)	Vol. (L)
A 1/2	79	70	50	0.2	CI 1/2	71	62.5	57.5	0.06
A 1	90	91	63	0.2	CI 1	90	60	59	0.1
A 2	110	105	70	0.4	CI 1 1/2	140	70	68.5	0.3
A 3	130	112	75	0.4	CI 2	155	94	87	0.45
A 4	145	115	72	0.6	CI 6	251	112.5	110.5	1.3
A 5	155	123	83	0.6	CI 8	203	120	116	1.2
A 6	165	129	85	1	CI 15	256	153	145	2.2
A 8	179	160	101	1.2	CI 30 H320	324	165	145	3.2
A 10	200	161	110	1.6	CI 30 H38	386	165	155	3.7
A 12	217	170	117	2	CI 50	325	227	218	6.35
A 14	220	184	128	2.2	CI 60	425	227	215	8.75
A 16	232	193	132	2.6	CI 70	370	253	240	8.7
A 20	260	204	145	3.4	CI 100	383	272	260	11
A 25	259	216	155	4	CI 150	454	317	305	20
A 30	286	234	166	5	CI 250	552	400	385	38
A 40	313	265	191	7	CI 300	560	410	400	42
A 50	330	282	203	8	CI 400	670	450	43.5	60
A 60	347	291	205	10	CI 500	660	485	470	71.5
A 70	367	292	205	10.6	CI 500(750H)	750	485	470	82.5
A 80	374	311	222	13	CI 800	745	536	515	93
A 100	402	335	245	16	CI 900	1068	572	556.5	145
A 120	423	344	260	20	CI 1000	833	595	585	135
A 150	476	371	260	24.6	CI 1500 lt	1270	645	600	253
A 200	507	397	292	31	CI 2000	1290	670	590	277
A 250	558	415	290	36.5	CI 4000	1668	820	790	576
A 300	571	435	313	41.5					
A 400	647	495	340	65					
A 500	663	520	350	68.5					
A 600	723	528	390	83					
A 800	804	542	380	94					
A 1000	826	632	430	134					
FORMATO BU / FORMATO B					FORMATO C				
BU 125	448	533	310	43	C 20	371	158	108	3.5
BU 150	485	530	310	50	C 50	417	233	170	8.5
BU 200	607	540	310	67	C 200	617	370	250	34
BU 250	635	614	380	103.5	C 300	673	420	265	44
BU 300	702	618	380	117	C 400	805	435	295	66
BU 313	605	760	460	135	C 500	940	462	295	75
BU 350	803	622	380	128	C 700	840	530	370	113
BU 380	904	600	375	146	C 800	965	555	370	122
BU 400	710	767	450	174.5					
BU 450	740	785	450	196					
BU 500	807	785	450	215					
BU 600	905	785	450	250					
BU 700	1052	790	450	296					
B 300	702	660	330	141					
BL 300	605	755	440	160					
BL 400	725	755	430	182					
BL 450	769	755	430	192					
BP 900	974	874	365	300					
BP 1000	1174	874	365	423					
B 800	818	1013	420	401					
B 1200	1038	1020	460	550					



Fuente: MORGANITE BRASIL LTDA. Salamender Grafinox. [Citado: 8 diciembre de 2018].
Disponible en: www.morganmms.com

ANEXO B.
CERAMICO REFRACTARIO PARA CRISOL



ARTICLE		SIZE (mm) Ø x H	CAPACITY (GOLD)	COVER	MODEL
Graphite	G.03 At	48 x 90	gr.1000	C.35	F1 TURBO
Ceramic	C.26 T	56 x 87			
Graphite	G.03	58 x 88	gr.1000	C.35	F1
Ceramic	C.26	68 x 86			
Graphite	G.02	74 x 88	gr.2000	C.34	K2
Ceramic	C.27	85 x 86			
Graphite	G.09	68 x 108	gr.2000	C.34 C.43	CG150s F3 low
Ceramic	C.49	80 x 109			
Graphite	G.95	68 x 127	gr.3000	C.34 C.43	F3 high CG 160
Ceramic	C.168	80 x 132			
Graphite	G.62	98 x 104	gr.3000	C.30 C.42	K3
Ceramic	C.149	98 x 100			
Graphite	G.05	80 x 135	gr.4000	C.42	CG350s F4
Ceramic	C.24	97 x 132			
Graphite	G.13	98 x 130	gr.5000	C.30	K5
Ceramic	C.03	118 x 135			
Graphite	G.04	100 x 160	gr.8000	C.58 C.42	CG600s F5 x Kg 8
Ceramic	C.29	118 x 156			
Graphite	G.37	110 x 180	gr.10000	C.58	F9 EXTRA RING K10
Ceramic	C.134	128 x 176			
Graphite	G.18	150 x 200	gr.16000		CG1000s F16
Ceramic	C.28	158 x 196			

Propiedad	Refractarios de alta densidad	Refractarios de baja densidad (fibra cerámica)
Conductividad térmica (W/m·K)	1.2	0.3
Calor específico (J/kg·K)	1000	1000
Densidad (kg/m ³)	2300	130

Fuente: FOSSATI. (2011). *Crisolos > Crisolos para hornos a induccion* [citado:6 de septiembre de 2018]. Disponible en: http://www.fossati.com/Cilindricos--Grafito-con-borde_19_1_3.html

ANEXO C.
TUBO DE SELECCIÓN PARA BOBINA

TUBO DE COBRE FLEXIBLE TIPO U.G. BOBINAS TIPO LEVEL WOUND
USOS: PARA REFRIGERACIÓN

Aleación: C-12200
Norma: A.S.T.M. B-88
Norma: A.S.T.M. B-42
Norma: NMX-W-18
Largo: 18.29m

NÚMERO DE CATÁLOGO	DIÁMETRO EXTERIOR		DIÁMETRO INTERIOR		ESPESOR		PESO S/M kg	PESO APROXIMADO POR PIEZA
	PULGS.	MM	PULGS.	MM	PULGS.	MM		
	1/4	6.350	0.190	4.826	0.030	0.7620	0.120	2.1948
	5/16	7.938	0.248	6.299	0.032	0.8128	0.162	2.9629
	3/8	9.525	0.311	7.899	0.032	0.8128	0.199	3.6397
	1/2	12.700	0.436	11.074	0.032	0.8128	0.272	4.9748

Fuente: METAL TEJ. Catalogo 2018. Tubo de cobre metal tej. [Citado: 6 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.metaltelj.com.mx>

ANEXO D.
MANGUERAS DE CONEXIÓN

Carbon Free Hose Extended Range

Recommended For: Gates Carbon Free Hose is recommended for Furnace Coolant & Electrical Cable Coolant Applications in Steel Industry and other non-conductive applications.

Construction:

- **Tube:** Specialized Synthetic Rubber, Grey color.
- **Reinforcement:** High Tenacity Synthetic Yarn.
- **Cover:** Specially Compounded Nitrile, Green color.

Service Temperature Range: -40°C to +100°C

Nom. Diámetro interior (mm)	Tolerancia en Nom. agujero (mm)	WP (Kg. / Cm2)	PP (Kg. / Cm2)	BP (Kg. / Cm2)
12.5	± 0.75	10.0	20.0	40.0
16.0	± 0.75	10.0	20.0	40.0
20.0	± 0.75	10.0	20.0	20.0
25.0	± 1.25	± 1.25	20.0	40.0
28.0	± 1.25	10.0	20.0	40.0
31.5	± 1.25	10.0	20.0	40.0
35.0	± 1.50	10.0	20.0	40.0
38.0	± 1.50	10.0	20.0	40.0
50.0	± 2.00	10.0	20.0	40.0
56.0	± 2.00	10.0	20.0	40.0
60.0	± 2.00	10.0	20.0	40.0
63.0	± 2.00	10.0	20.0	40.0
70.0	± 2.00	10.0	20.0	40.0
75.0	± 2.00	10.0	20.0	40.0
100.0	± 2.50	10.0	20.0	40.0
150.0	± 3.00	10.0	20.0	40.0

Fuente: Fuente: COPYRIGHT. Conexiones hidráulicas y conjunto de mangueras flexibles [citado:6 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.boxerindia.com>

ANEXO E.
CONCRETOS REFRACTARIOS

GAMMA

ERECOS®

CORONA
Negocio de Energía
Carrera 49 No. 67 Sur 680
Sabaneta, Colombia - 055450
Teléfono : [574] 305 8000
ventas@erecos.com
Nº: 890.900.121-4

Concretos Refractarios

Los concretos refractarios convencionales densos son mezclas de materiales refractarios molidos con una granulometría adecuada y aditivos ligantes. Los concretos desarrollan una liga hidráulica, que les confiere buenas propiedades mecánicas en frío. Con el incremento de la temperatura se desarrolla la liga cerámica, que les confiere alta resistencia mecánica en el uso.

CONCRAX 1300	Propiedades	Aplicaciones
Clasificación NTC - 814, ASTM C - 401	Clase B	Concreto refractario sílico aluminoso denso, para aplicaciones generales en zonas cuya temperatura de trabajo no exceda de 1300°C. Indicado para la construcción de bloques para quemadores, plataformas de carros de hornos túneles, revestimiento de calderas, etc.
ANÁLISIS QUÍMICO (%)		
Al ₂ O ₃	43.4	
SiO ₂	42.8	
Fe ₂ O ₃	4.1	
TiO ₂	1.6	
CaO	7.0	
MgO	0.3	
Alcalis	0.8	
CPE	14	
Temperatura equivalente (°C) NTC-706, ASTM C-24	1398	
Máxima temperatura de servicio	1300	
Máximo tamaño del grano (mm)	10	
Material seco requerido por metro cúbico (kg)	2000-2150	
Agua de preparación (cm ³ de agua/kg de material seco) NTC - 988, ASTM C - 860	130-140	
DENSIDAD VOLUMETRICA (gr/cm³)		
ASTM C - 134		
110°C	2.05-2.20	
1000°C	2.00-2.10	
1260°C	2.00-2.10	
MÓDULO DE RUPTURA EN FRÍO (MPa)		
NTC - 988, ASTM C-133		
110°C	5.0-8.0	
1000°C	2.0-5.0	
1260°C	5.0-8.0	
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN FRÍO (MPa) NTC - 988, ASTM C-133		
110°C	25.0-50.0	
1000°C	20.0-30.0	
1260°C	20.0-30.0	
CAMBIO LINEAL PERMANENTE (%)		
NTC - 988, ASTM C - 401 y ASTM C - 865		
1000°C	0.0-0.2C	
1260°C	0.5C-0.5E	
Presentación kg	25	

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

25

Fuente: COL MAQUINAS. Catálogo de cemento refractario [citado: 6 de septiembre de 2017]. Disponible en: <http://www.gamma.com.co/CONCRAX-1300.pdf>

ANEXO F. COTIZACIÓN COMPLETA

**Oferta IEPF 410
HORNO DE FUSIÓN DE METALES POR INDUCCIÓN.
COMBUSTIBLE: ELECTRICIDAD.**



SIN BASCULAMIENTO

Especificaciones Técnicas:

- | | |
|-----------------------------------|---------------|
| • Potencia nominal | 10 Kw |
| • Suministro eléctrico monofásico | 220 V / 60 Hz |
| • Flujo de Agua | 0,34 m3 / h |
| • ventilador | Axial |
| • Sala de temperatura máxima | 43 ° C |
| • Potencia absorbida | 1,3 kVA |
| • La eficiencia de refrigeración | 4 kW |

Datos de Producción:

- | | |
|--------------------------------|-------------------------|
| Material: | Acero |
| Capacidad del Crisol: | 3 kg |
| Tiempo de Fusión: | 20 minutos aproximados. |
| Temperatura Máxima del Crisol: | 1700°C |
| Material: | Cobre |
| Capacidad del Crisol: | 3.5 kg |
| Tiempo de Fusión: | 25 minutos aproximados. |
| Temperatura Máxima del Crisol: | 1200°C |
| Material: | Aluminio |
| Capacidad del Crisol: | 1, kg |
| Tiempo de Fusión: | 15 minutos aproximados. |
| Temperatura Máxima del Crisol: | 1000°C |

Propuesta Económica y Forma de Pago:

	\$ 68.500.000		SUBTOTAL
	\$ 2.055.000	3%	DESCUENTO
	\$ 66.445.000		TOTAL
FORMA DE PAGO	\$ 33.222.500	50%	ORDEN DE COMPRA
	\$ 16.611.250	25%	A DOCUMENTOS EN ZONA FRANCA O DEPOSITO HABILITADO
	\$ 16.611.250	25%	8 DIAS DESPUES DE INSTALADO

Tiempo de entrega 8 semanas.

El sistema se entrega funcionando en sus instalaciones.

Se aplicarán pólizas de manejo de anticipos, tiempo de entrega, cumplimiento, calidad y garantía por un año.

Referente a la nacionalización los costos son pagados por IEPF y la declaración de importación saldrá a nombre de la Universidad Central y factura en términos dentro de zona franca o bodega habilitada para buscar la exención del IVA. Para ello la Universidad Central pagara los derechos aduaneros en este caso el IVA, ya que el gravamen es 0%.

Atentamente:

Ing. Santiago Díaz Ríos
Gerente General



Fuente: Santiago Díaz IEPS SAS

ANEXO G.
PLANOS.

Ver anexo en el CD Room.