

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DEL SUR DE GUANAJUATO



“Análisis y diseño de un horno académico para fundición de aluminio”

Opción 2 Titulación Integral – Tesis profesional

Elaborada por:

Mario González Guzmán

Que presenta para obtener el título de:

INGENIERO EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

Asesor:

Ing. Rogelio Orozco Martínez

“Análisis y diseño de un horno académico para fundición de aluminio”

Elaborada por:

Mario González Guzmán

Aprobado por. Ing. Rogelio Orozco Martínez
Docente de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices
Asesor de la Tesis Profesional

Revisado por. MTW David Morales Orozco
Jefe de División de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices
Revisor de la Tesis Profesional

Revisado por. M.C Mariano Braulio Sánchez
Docente de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices
Revisor de la Tesis Profesional

DEPARTAMENTO
ACADEMICO

CLAVE:11EIT0002E
ISA-EGR-AD2023/09

Uriangato, Guanajuato, **20/octubre/2023**

Asunto: Aprobación de impresión de trabajo profesional

C. Mario González Guzmán

PRESENTE:

Por medio de este conducto, le comunico a usted que después de haber sido revisado su trabajo de titulación bajo la del cual se derivó la Monografía Titulada:

“Análisis y diseño de un horno académico para fundición de aluminio”

La comisión revisora, ha tenido a bien aprobar la impresión de este trabajo.

ATENTAMENTE

*“Excelencia en Educación Tecnológica”
“Tecnología y Calidad para la Vida”*

M.C Mariano Braulio Sánchez

Jefe de División de Ingeniería en Sistemas Automotrices



Instituto Tecnológico Superior
del Sur de Guanajuato
COORDINACIÓN INGENIERÍA
EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

c.p Unidad de Servicios Escolares

C.c.p División de Ingeniería en Sistemas Automotrices

C.c.p Archivo Consecutivo



Ave. Educación Superior No. 2000, Col. Juárez, Uriangato, Guanajuato, C.P. 38982

Tels. (445) 45 7 74 68 al 71 Ext. *144, e-mail: automotrices@itsur.edu.mx

tecnm.mx | surguanajuato.tecnm.mx





LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

Uriangato, Gto. 19 octubre 2023

Asunto: Liberación de proyecto para la titulación integral

M.I José Gabriel Aguilera González
Director Académico
ITSUR
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre de estudiante y/o egresado(a): Mario González Guzmán	
Carrera: Ingeniería en Sistemas Automotrices	Núm. de control: T18120111
Nombre del proyecto: Análisis y diseño de un horno académico para fundición de aluminio	
Producto: Tesis Profesional	

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestras y nuestros egresados.

ATENTAMENTE

M.C. Mariano Braulio Sánchez
Jefe de División de Ingeniería en Sistemas Automotrices
ITSUR



La comisión revisora ha tenido a bien aprobar la reproducción de este trabajo.

Instituto Tecnológico Superior
del Sur de Guanajuato
COORDINACIÓN INGENIERÍA
EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

Ing. Rogelio Orozco Martínez Asesor de la Tesis Profesional	M.T.W David Morales Orozco Revisor de la Tesis Profesional	M.C. Mariano Braulio Sánchez Revisor de la Tesis Profesional

c.c.p.- Expediente

Julio 2017

“Análisis y diseño de un horno académico para fundición de aluminio”

Resumen:

Analizar y diseñar un horno académico para fundir aluminio serie 3xxx reciclado de residuos domésticos, el cual tiene como finalidad ser utilizado como equipo didáctico en el Laboratorio de Manufactura por alumnos de la coordinación de Ingeniería en Sistemas Automotrices del Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato. Esta investigación fue sustentada mediante el análisis y aplicación de teoremas de distintas ramas de la ingeniería, los cuales permitieron exhibir los hechos particulares, que, en este caso, lleve a cumplir con los requerimientos y especificaciones del horno necesarias para su correcto diseño y funcionamiento.

Como complemento, se utiliza el método experimental para proporcionar datos e información en tiempo real que permita modificar y corregir posibles errores o mejoras del prototipo. Por lo tanto, la investigación no solo se basa en un método, y busca que la parte teórica no pierda su sentido. Posteriormente se comprueban los resultados obtenidos de manera analítica con el proceso experimental de la fundición de aluminio, a su vez, se realiza una simulación con la ayuda de un software CAD (SolidWorks) que permite proporcionar y evidenciar datos para su posterior comparación con los ya obtenidos por los métodos mencionados con anterioridad.

Para la construcción de un prototipo de horno se emplean materiales como ladrillos refractarios, mortero, termopares, resistencias eléctricas, microcontroladores, etc. Para determinar las dimensiones y especificaciones se basa en una búsqueda de antecedentes que posteriormente se seleccionan dependiendo las características que se desean tener. Se concluye con el prototipo del horno terminado, el cual funciona de manera perfecta, se utiliza y además es explotado por las actuales y futuras generaciones de estudiantes de la carrera de Ingeniería en Sistemas

Automotrices dentro de sus actividades curriculares fomentando el estudio e investigación de distintos proyectos que les permitan alcanzar sus objetivos dentro de la institución.

Abstract:

Analyze and design an academic furnace to melt 3xxx series aluminum recycled from household waste, which is intended to be used as didactic equipment in the Manufacturing Laboratory by students of the Automotive Systems Engineering coordination of the Superior Technological Institute of the South of Guanajuato. This investigation was supported by the analysis and application of theorems of different branches of engineering, which allowed to exhibit the particular facts, which, in this case, lead to comply with the requirements and specifications of the furnace necessary for its correct design and operation.

As a complement, the experimental method is used to provide data and information in real time that allows to modify and correct possible errors or improvements of the prototype. Therefore, the investigation is not only based on a method, and seeks that the theoretical part does not lose its meaning. Subsequently, the results obtained are verified analytically with the experimental process of aluminum casting, in turn, a simulation is carried out with the help of CAD software (SolidWorks) that allows providing and evidencing data for subsequent comparison with those already obtained by the methods mentioned above.

Materials such as refractory brick, mortar, thermocouples, electrical resistances, microcontrollers, etc. are used to build a prototype furnace. To determine the dimensions and specifications, it is based on a background search that is later selected depending on the characteristics that are desired to have. It concludes with the prototype of the finished oven, which works perfectly, is used and is also exploited by current and future generations of students of the Automotive Systems

Engineering career within their curricular activities, promoting the study and research of different projects that allow them to achieve their objectives within the institution.

Palabras claves:

Horno eléctrico, resistencias eléctricas, materiales refractarios, fundición de aluminio, tratamientos térmicos.

Keywords:

Electric furnace, electrical resistances, refractory materials, aluminum casting, heat treatments.

En primer lugar, les agradezco a todas las personas cercanas a mí que me han brindado su apoyo para poder cumplir todos mis objetivos personales y mi proceso de formación académica. Ellos son los que con su presencia me han impulsado siempre a perseguir mis metas, ser persistente y nunca doblegarme frente a las adversidades.

Agradezco a mis semejantes, quienes han sido un pilar importante en mi desarrollo personal, a ellos por ser quienes son, por compartirme de sus alegrías y de sus experiencias personales, por brindarme su confianza y por estar cuando fue necesario.

A mis presentes y pasados amigos, cómplices y hermanos que siempre tendrán un valor especial en mi vida por su lealtad y compañerismo, por su carisma y carácter, por su sabiduría e inteligencia que, poco o mucho logré aprender de ustedes, en mi ser está su granito de arena.

También agradezco a quienes han sido mis tutores y maestros, por su dedicación y paciencia, sin sus palabras, conocimientos y correcciones no hubiese podido llegar a esta instancia de mi vida tan anhelada. Gracias por su guía y todos sus consejos, los llevaré grabados para bien y siempre en la memoria de mi futuro profesional.

Pero antes que a nadie quiero agradecerme a mí mismo, a mi yo de hace unos años quien temía por su futuro y por la incertidumbre del qué vendrá después, sin tu valor y valentía, sin tu esfuerzo y sacrificio, sin tu dedicación y necesidad de conseguir todo lo que te propones nada de esto hubiese sido posible, hoy mando un abrazo y un mensaje de aliento al pasado.

Mario González Guzmán.

22/07/00

Índice General

Capítulo 1	14
Introducción.	14
Capítulo 2	15
Marco teórico (Antecedentes)	15
Capítulo 3	30
Planteamiento del problema	30
Identificación.	30
Justificación.	30
Alcance.	31
Capítulo 4	32
Objetivos	32
Objetivos generales.	32
Objetivos específicos.	32
Capítulo 5	33
Metodología	33
Capítulo 6	80
Resultados	80
Capítulo 7	91
Análisis de Resultados	91
Capítulo 8	101
Conclusiones y trabajo a futuro	101
Referencias bibliográficas	103
Anexos	106

Índice de figuras

Figura 1. Razón de conducción de calor.	19
Figura 2. Razón de convección de calor.	20
Figura 3. Razón máxima de radiación.	21
Figura 4. Radiación emitida por la superficie.....	21
Figura 5. Diagrama de una termocupla tipo K.	26
Figura 6. Modelado de la cámara principal del horno.....	35
Figura 7. Modelado de la cubierta de metal del horno.....	36
Figura 8. Modelado de la puerta de metal del horno.	36
Figura 9. Modelado de un sello hermético para la puerta del horno.....	37
Figura 10. Modelado de los soportes del horno.....	37
Figura 11. Modelado de una manija cilíndrica para la puerta del horno.	38
Figura 12. Modelado y vistas isométricas del ensamble final del horno.	38
Figura 13. Simulación térmica.	39
Figura 14. Boceto dimensionado de la cámara interna del horno.....	40
Figura 15. Dimensiones del crisol para la fundición.	43
Figura 16. Diagrama de las resistencias en el sistema.	44
Figura 17. Diagrama de las paredes compuestas del horno.	46
Figura 18. Dimensiones de las paredes del horno.	47
Figura 19. Diagrama final de resistencias.	48
Figura 20. Temperaturas teóricas en la pared compuesta del horno.	50
Figura 21. Latas de refresco recolectadas.	51
Figura 22. Lata cortada y posteriormente lijada y limpiada.	52
Figura 23. Latas trozadas por medio de una guillotina.	53
Figura 24. Trozos de lata comprimidos por medio de una prensa hidráulica.	54
Figura 25. Trozos de aluminio comprimidos en un crisol.....	54
Figura 26. Primera fase del proceso de fundición del aluminio.	55
Figura 27. Molde elaborado con arena.....	56
Figura 28. Vertido del material en estado líquido.	56
Figura 29. Inducción de corriente al alambre a través de una fuente de voltaje... 58	
Figura 30. Segundo trozo de alambre sometido a una corriente eléctrica.....	59
Figura 31. Ladrillo ranurado en forma "C".	60

Figura 32. Pre-acomodo de los ladrillos ranurados.	60
Figura 33. Trenzado del alambre.....	61
Figura 34. Resistencia de alambre trenzado.	61
Figura 35. Incrustación de las resistencias a los ladrillos.	62
Figura 36. Aplicación de la mezcla y unión de los ladrillos.	63
Figura 37. Estructura en reposo para el proceso de secado.	64
Figura 38. Terminales de las resistencias incrustadas en la cámara.	64
Figura 39. Fuentes de poder suministrando energía a las resistencias.....	65
Figura 40. Voltaje entregado de la resistencia comercial.	66
Figura 41. Amperaje de corriente a través de la resistencia comercial.	66
Figura 42. Termopar incrustado en la cámara del horno.	67
Figura 43. Interfaz de arduino mostrando las diferentes temperaturas censadas.	67
Figura 44. Nuevo diagrama de la cámara interna del horno.....	68
Figura 45. Croquizado de la estructura de metal.....	72
Figura 46. Pre acomodo de los ladrillos.	73
Figura 47. Ranurado de los ladrillos.	73
Figura 48. Unión de los ladrillos refractarios.....	74
Figura 49. Prototipo a la espera de secar.....	74
Figura 50. Resistencias instaladas en la cámara del horno.....	75
Figura 51. Resistencias calibre 18 y termopar tipo K instalados.	75
Figura 52. Resistencias eléctricas en funcionamiento.....	76
Figura 53. Conexión del prototipo final.	76
Figura 54. Crisol lleno de aluminio triturado.	77
Figura 55. Comienzo de la prueba de fundición.	77
Figura 56. Aislamiento de la cámara interna del horno.	78
Figura 57. Temperatura exterior de horno.....	78
Figura 58. Interfaz de arduino con las máximas temperaturas censadas.....	79
Figura 59. Extracción del crisol y enfriamiento del horno.	79
Figura 60. Resultado de potencia de entrada en simulación.....	80
Figura 61. Resultado de la potencia de salida en simulación.....	81
Figura 62. Procesamiento de latas.....	81

Figura 63. Molde de arena para fundición de aluminio.	82
Figura 64. Diagrama de fases para fundir latas de aluminio.....	82
Figura 65. Crisol a 300°C dentro de la mufla.....	83
Figura 66. Aluminio a una temperatura estimada de 600°C.	83
Figura 67. Masa de aluminio solidificada.....	84
Figura 68. Crisol a 800°C dentro de la mufla.....	84
Figura 69. Aluminio obtenido de la fundición.....	85
Figura 70. Resistencia eléctrica conectada a 120v.	85
Figura 71. Vista frontal e isométrica del prototipo.....	87
Figura 72. Prototipo en funcionamiento.....	87
Figura 73. Prototipo final del horno.....	88
Figura 74. Cámara interna del horno.....	88
Figura 75. Temperatura obtenida de la prueba de calentamiento.	89
Figura 76. Temperatura obtenida después de 30 minutos.	89
Figura 77. Virutas de aluminio no fundidas.....	90
Figura 78. Fundición de latas no procesadas.....	93
Figura 79. Fundición de latas procesadas.....	93
Figura 80. Muestras obtenidas de las fundiciones.....	94
Figura 81. Temperatura obtenida con una pistola térmica.	94
Figura 82. Gráfica Iteración-Temperatura.	98
Figura 83. Gráfica Voltaje - Temperatura.	98
Figura 84. Lectura de la temperatura del horno.....	99
Figura 85. Resultado de aluminio a temperatura ambiente.	100
Figura 86. Captura de análisis térmico al crisol con el material dentro.....	100
Figura 87. Diagrama de los tratamientos térmicos.	109

Índice de tablas

Tabla 1. Tipos de termocuplas y sus características.	26
Tabla 2. Desempeño de una resistencia eléctrica.	86
Tabla 3. Cuadro comparativo entre los tipos de ladrillos utilizados.....	95
Tabla 4. Cuadro comparativo entre los tipos de ladrillos utilizados.....	96
Tabla 5. Cuadro comparativo entre los tipos de resistencias utilizadas.....	97
Tabla 6. Voltaje - Tiempo - Temperatura.	99
Tabla 7. Ladrillo refractario K23.	106
Tabla 8. Alambre Kanthal A1.	107
Tabla 9. Mortero refractario.....	107
Tabla 10. Fibra cerámica.	107
Tabla 11. Códigos de tratamientos térmicos para aluminio.	108
Tabla 12. Puntos de fusión de algunos materiales.	110

Capítulo 1

Introducción.

Un horno calentado a través de resistencias eléctricas es un equipo que puede fomentar el aprendizaje y la práctica de un estudiante de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices, siendo el conocimiento de metalurgia, mecánica de materiales y procesos de fundición un pilar importante en la retícula escolar de la carrera para aspirar a convertirse en un ingeniero apto y de calidad. La utilización de un horno mufla puede consolidar, reforzar y ampliar los conocimientos teóricos y prácticos de los alumnos en pruebas de fundición y tratamientos térmicos a distintos materiales.

Para cumplir con el objetivo principal es necesario llevar a cabo una investigación y desempeñar una serie de tareas específicas, en el presente proyecto se analiza la estructura y funcionamiento de un horno eléctrico, el estudio de las propiedades y características de los materiales empleados para su construcción, así como el principal propósito para el cual están diseñados, como lo son las fundiciones de metales o tratamientos térmicos.

La razón por la cual se impulsó ésta investigación fue la necesidad de acreditar la materia de Residencias Profesionales mediante el desarrollo de un proyecto innovador donde se aplicarán los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera; después de plantear algunas ideas se decidió proceder con el proyecto de un horno académico el cual resolvía algunas problemáticas en la institución como fue el disminuir la saturación de alumnos utilizando la mufla industrial que se encuentra en las instalaciones del Tecnológico, y que a su vez, promovía la realización de prácticas con fines didácticos y abría las puertas a otros proyectos con los cuales se podría trabajar en conjunto para así, tener una mayor serie de beneficios a los alumnos no sólo de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices sino de todo el plantel.

Capítulo 2

Marco teórico

Generalidades

En este capítulo se presentan las consideraciones generales que se deben de tomar en cuenta para la construcción de un horno académico para fundición de aluminio; para este se requiere del conocimiento previo de como fundir, es necesario poseer un panorama de los aluminios que serán fundidos, propiedades y aleaciones. Además de también conocer elementos de la transferencia de calor y conocimiento de los elementos constructivos, el procedimiento para usarlos y mantenerlos. Por último, pero no menos importante, conocer la historia del horno para uso industrial, predecesores de uso didáctico además de su uso, por lo tanto, en los párrafos siguientes se introduce al lector en estos temas, como también se informa sobre los tipos de hornos industriales, tipos y propiedades de aluminio y aleaciones, aplicación de la transferencia de calor en hornos.

Introducción a los hornos industriales

Un horno mufla es aquel horno que puede generar elevadas temperaturas y sirve para calentar materiales que son sometidos a distintos procesos como los tratamientos térmicos o procesos de fundición. Estos hornos muflas son utilizados en distintas industrias como la metalurgia principalmente, así como en otras áreas donde se lleven a cabo secado y calcinación de precipitados, ensayos de flamabilidad a alta temperatura, aleaciones de metal, temple, ensayos de fundición y otros procesos que requieren de un tratamiento térmico. Los hornos mufla calientan el material por acción directa o indirecta de un flujo de calor eléctrico, para el calentamiento se debe tomar en cuenta el tamaño, la forma y la temperatura de la probeta a ser tratada térmicamente. [1]

Se puede entender que un horno eléctrico es un equipo o dispositivo donde se calientan materiales, piezas o elementos, esto con distintos fines según la

necesidad de cada usuario, para evitar ambigüedades se denominarán hornos a todos aquellos equipos o instalaciones que operan, en todo o en parte de un proceso, a temperatura superior al ambiente utilizando un medio para elevar su temperatura. [1]

El calor generado por dichos hornos es transmitido a los materiales mediante los mecanismos de conducción, convección y radiación. De esta manera, atendiendo al tipo de efecto que el horno produce, se pueden tener hornos de fusión, hornos de calentamiento y hornos para producir efectos químicos, cabe destacar que el presente trabajo hace referencia a los hornos académicos que tienen como propósito el tratamiento térmico de materiales para impartir y analizar las propiedades del mismo. Los hornos para tratamientos térmicos se clasifican de acuerdo a los siguientes criterios: por proceso de calentamiento, por el tipo de atmosfera y por tipo de solera. [1]

Tipos de hornos

Por proceso de calentamiento.

El sistema de calentamiento que se acopla al horno depende de la temperatura a conseguir, misma que es función de la naturaleza del material a tratar térmicamente y de las características del proceso de tratamiento. Se dividen en tres. [1]

Calentamiento por resistencias eléctricas.

Los hornos de resistencias son aquellos en que la energía requerida para el calentamiento del material es de tipo eléctrico y procede de la resistencia óhmica directa de las piezas o de resistencias eléctricas dispuestas en el horno que se calientan por efecto Joule y ceden calor a la carga por las diversas formas de transmisión de calor. [1]

Calentamiento por gas o combustible.

Estos por su parte, utilizan gas natural como combustible, se muestran eficaces, tanto por la reducción de los tiempos de cocción de las materias primas, como la reducción de las emisiones al ambiente. Una de las ventajas sobre otros tipos de hornos es el alcanzar altas temperaturas en un menor tiempo. Además, variando la inyección de la mezcla de gas y aire permite regular la atmósfera en el interior del horno por lo que resultan útiles para hacer reducciones. [1]

Por el tipo de atmosfera.

En tratamientos térmicos se entiende por atmosfera a la masa gaseosa encerrada dentro del horno, que está en contacto con las piezas a tratar, las atmosferas pueden tener carácter neutro, oxidante o reductor, además, el papel desempeñado por la atmosfera controlada es doble, por una parte, evita que se produzcan oxidación y descarburación, por otra parte, permite realizar las acciones previstas, la reducción de óxidos superficiales y la eliminación de gases absorbidos. [1]

Transferencia de calor.

La transferencia de calor es la energía en tránsito debida a una diferencia de temperaturas. En general se tienen tres métodos o mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación; es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones o modelos apropiados, estas ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se trasfiere por unidad de tiempo. [2]

El requisito básico para la transferencia de calor es la presencia de una diferencia de temperatura ya que no puede haber transferencia neta de calor entre dos medios que están a la misma temperatura.

La diferencia de temperatura es la fuerza impulsora para la transferencia de calor, precisamente como la diferencia de tensión es la fuerza impulsora para el flujo de corriente eléctrica y la diferencia de presión es la fuerza impulsora para el flujo de fluidos. [2]

Transferencia de calor en ingeniería.

El equipo de transferencia de calor como los intercambiadores de calor, las calderas, los condensadores, los radiadores, los calentadores, los hornos, los refrigeradores y los colectores solares están diseñados tomando en cuenta el análisis de la transferencia de calor. Los problemas de esta ciencia que se encuentran en la práctica se pueden considerar en dos grupos: de capacidad nominal y de dimensionamiento. Los problemas de capacidad nominal tratan de la determinación de la razón de la transferencia de calor para un sistema existente a una diferencia específica de temperatura. Los problemas de dimensionamiento tratan con la determinación del tamaño de un sistema con el fin de transferir calor a una razón determinada para una diferencia específica de temperatura. [2]

Termodinámica.

El calor es la forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura. Después de todo, se puede determinar la cantidad de transferencia de calor para cualquier sistema que pase por cualquier proceso, con la sola aplicación del análisis termodinámico. [2]

La termodinámica trata de los estados de equilibrio y de los cambios desde un estado de equilibrio hacia otro. Por otra parte, la transferencia de calor se ocupa de los sistemas en los que falta el equilibrio térmico y, por tanto, existe un fenómeno de no equilibrio. Por lo tanto, el estudio de la transferencia de calor no puede basarse sólo en los principios de la termodinámica. [2]

Mecanismos de transferencia de calor.

Un análisis termodinámico se interesa en la cantidad de transferencia de calor conforme un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro. La transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura. El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. [2]

Conducción.

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas (Figura 1). La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él. [2]

$$\text{Razón de conducción del calor} \propto \frac{(\text{Área})(\text{Diferencia de temperatura})}{\text{Espesor}}$$
$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{W})$$

Figura 1. Razón de conducción de calor.
Fuente: [2]

En donde k es el coeficiente de transferencia de calor por conducción, A es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por conducción, Δx es el espesor de la pared plana, $\Delta T = T_2 - T_1$ es la diferencia de temperatura entre las dos superficies y Q la razón de la transferencia de calor. [2]

Convección.

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos

combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las razones de esa transferencia. [2]

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento como se observa en la Figura 2:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s (T_s - T_\infty) \quad (\text{W})$$

Figura 2. Razón de convección de calor.
Fuente: [2]

En donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ o $\text{Btu}/\text{h}\cdot\text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$, A_s es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie. Note que en la superficie la temperatura del fluido es igual a la del sólido.

Radiación.

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío. [2]

La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s (en °K o °R) es expresada por la ley de Stefan Boltzmann como se muestra en la Figura 3:

$$\dot{Q}_{\text{emitida, máx}} = \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{W})$$

Figura 3. Razón máxima de radiación.
Fuente: [2]

donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{) \cdot K}^4$, o bien, $0.1714 \times 10^{-8} \text{ (Btu/h \cdot ft}^2\text{)}$, R_4 es la constante de Stefan-Boltzmann. La superficie idealizada que emite radiación a esta razón máxima se llama cuerpo negro y la radiación emitida por éste es la radiación del cuerpo negro. Las radiaciones emitidas por todas las superficies reales son menores que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como en la Figura 4:

$$\dot{Q}_{\text{emitida}} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{W})$$

Figura 4. Radiación emitida por la superficie.
Fuente: [2]

en donde ε es la emisividad de la superficie.

La diferencia entre las razones de la radiación emitida por la superficie y la radiación absorbida es la transferencia neta de calor por radiación. Si la razón de absorción de la radiación es mayor que la de emisión, se dice que la superficie está ganando energía por radiación. De lo contrario, se dice que la superficie está perdiendo energía por radiación. [2]

Aleaciones de aluminio

Las aleaciones de aluminio se dividen en dos grupos:

- ✓ Aleaciones forjadas.
- ✓ Aleaciones fundidas.

Forjadas.

Por deformación plástica es que llevan ese nombre, tienen composiciones y microestructuras que son considerablemente diferentes de las aleaciones fundidas, reflejando así las necesidades del proceso de fundición. Las aleaciones forjadas tienen ciertas clasificaciones como 1xxx, 3xxx, 4xxx y 5xxx. Las aleaciones 1xxx y 3xxx son de una sola fase, excepto por la presencia de pequeñas cantidades de compuestos inter-metálicos, además sus propiedades son controladas por el endurecimiento por deformación, endurecimiento por solución sólida y control de tamaño de granos, Ahora las aleaciones 5xxx tienen dos fases a temperatura ambiente y las serie 4xxx también tienen dos fases, las aleaciones que contienen silicio y magnesio pueden ser endurecidos por envejecimiento al permite que se precipite el Mg_2Si . Por otro lado, las serie 2xxx, 6xxx y 7xxx son aleaciones que pueden endurecerse por envejecimiento. [3]

Fundidas.

La mayoría de las aleaciones contienen silicio para causar la reacción eutéctica para dar como resultado aleaciones de bajos puntos de fusión, buena fluidez (se refiere a la capacidad del metal líquido para fluir por un molde sin que se solidifique de forma prematura) y facilidad de moldeo (hace referencia a la facilidad con que un metal líquido bien fundido puede hacerse con la aleación) para el proceso final. [3]

Fundición de aluminio.

La fundición de aluminio se trata de un proceso en que se llena un molde con la cantidad de metal fundido requerido según la pieza a fundir con la finalidad de extraer, una vez el líquido haya solidificado, una pieza con la medida y forma del molde utilizado como pueden ser laminas, tubos, varillas, piezas, etc. Gracias a la fundición de aluminio se fabrican aquellas piezas de difícil construcción, y con la medida exacta demandada o pedida. La fundición de aluminio garantiza un ahorro

monetario y de tiempo notorios, ya que su manera de producción permite crear la cantidad exacta de material requerido. [4]

Existen diferentes tipos de procesos de fundición. Uno de los más importantes es la fundición por gravedad que en resumidas palabras es vertir líquido con crisoles a temperaturas que oscilan los 600 °C a 700 °C en un molde que puede ser rígido o semirrígido, además, dentro del molde se pueden añadir insertos metálicos para crear formas huecas dentro de la pieza, eso es usado de forma natural hoy en día. Para seguir con la descripción, cuando el aluminio se solidifica obtenemos la pieza, que se ha solidificado junto a sus canales o caminos del molde, por los que corre el aluminio líquido hasta que se asienta en la cavidad del molde. La velocidad y cantidad que vertimos es fundamental para que no aparezcan poros, escoria en especial, además de otros defectos de solidificación en la pieza, por lo que se estudia detenidamente la manera exacta en la que vertir el aluminio fundido sobre el molde en cada pieza, por ende, antes de sacar el crisol debe de saber el operador como y cuando vertir el aluminio fundido para que no se solidifique antes de tiempo y no se tengan problemas para el molde. [4]

En términos generales, la fundición de aluminio es el proceso de llenar un molde con la cantidad requerida de metal fundido de acuerdo con los requisitos o especificaciones, de modo que después de que el líquido se solidifica, se extrae una pieza con el tamaño y la forma del molde utilizado. Según la técnica utilizada y el tipo de molde utilizado se obtendrán algunas ventajas del material, por ejemplo: diferentes acabados superficiales, porosidad o geometría. Gracias a la fundición de aluminio podemos fabricar piezas con geometrías complejas y las medidas más precisas según las necesidades de producción. La fundición de aluminio garantiza una importante reducción de costes y tiempos porque se produce de forma que no perdamos material. [4]

Tratamientos térmicos

Es un conjunto de operaciones de calentamiento, permanencia a una temperatura dada y enfriamiento, en determinados tiempos y aplicadas a un metal o aleación en estado sólido de forma que produzca las propiedades deseadas en él. Los tratamientos térmicos basados en hornos sin sistema de enfriamiento admiten tener un error de temperatura de entre 30 a 50°C. [5] En la Tabla 12 puede encontrar algunos puntos de fusión de metales.

Tratamientos térmicos más usados

Los más usados son: recocido, temple, normalizado, revenido, temple en baño de sales, temple en baño de plomo. De éstos se hará mención a los cuatro primeros, ya que son los métodos aplicados en el laboratorio de tratamientos térmicos. [6]

Temple

Su principal objetivo es endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello se debe calentar el acero a una temperatura ligeramente superior a la crítica, permanencia y enfriarlo rápidamente (según composición y el tamaño de la pieza) en un medio conveniente, agua, aceite, aire. [6]

Revenido

Este tratamiento se da a la pieza de acero que han sido previamente templadas. Consiste en un calentamiento a temperatura inferior a la crítica, se mantiene a esta temperatura prefijada y después se enfría a una velocidad determinada (normalmente aire), con la finalidad de disminuir la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, quedando, además, el acero con la dureza o resistencia deseada. [6]

Normalizado

Este tratamiento consiste en calentamiento a temperatura ligeramente superior a la crítica, permanencia y seguido de un enfriamiento en aire tranquilo. De esta forma,

se deja el acero con una estructura y propiedades que arbitrariamente se consideran como normales y características de su composición. Con esto se logra eliminar tensiones internas y se uniformiza el tamaño de grano del acero. [6]

Recocido

Su principal objetivo es ablandar el acero; otras veces también se desea además regenerar su estructura o eliminar tensiones internas. Consiste en un calentamiento a temperaturas adecuadas, permanencia y enfriamientos lentos. [6]

Tratamientos térmicos para aluminio.

Una de las principales tareas de la industria metalúrgica es acometer con mucha rigurosidad los tratamientos térmicos que se aplican al aluminio en la actualidad, como todos sabemos existe poca información sobre este campo, pero es de vital importancia ya que estos tratamientos amplían la longevidad del uso de este material y las ventajas de extender su uso. Pero primero tenemos que darnos una pequeña retroalimentación sobre lo que significa "tratamiento térmico". Este término se refiere a la modificación de la estructura metalográfica y propiedades mecánicas de un material, que se basa en subir y bajar la temperatura de manera controlada. Un ejemplo muy común es el acero, el tratamiento térmico del acero es fundamental a nivel industrial debido a sus respectivos usos y operaciones en diferentes campos como la industria automotriz, manufactura, etc. Pero a pesar de esto, la situación con el aluminio es diferente, pues si bien estamos hablando del segundo material más utilizado y aplicado en industrias como la metalúrgica, automotriz e incluso de la construcción, este material es poco conocido, y para ser más específicos. [7]

Para los procesos térmicos y físicos del aluminio, la propia industria de materiales utiliza letras y números para crear códigos que indican qué procesos intervienen en el procesamiento del material finalmente obtenido, además de darle importancia a la deformación, porque al final combina Procesamiento y deformación, obtener el tratamiento final. [7] Obtenga información sobre los códigos para los tipos de tratamientos térmicos de aluminio en la Tabla 11 y la Figura 87 del Anexo II.

Termocuplas

Una termocupla se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck) del orden de los milivoltios el cual aumenta con la temperatura. [8]

Por ejemplo, en la Figura 5 se observa una termocupla "tipo J" está hecha con un alambre de hierro y otro de constatan (aleación de cobre y níquel). Al colocar la unión de estos metales a 750 °C, debe aparecer en los extremos 42.2 milivoltios. [8]

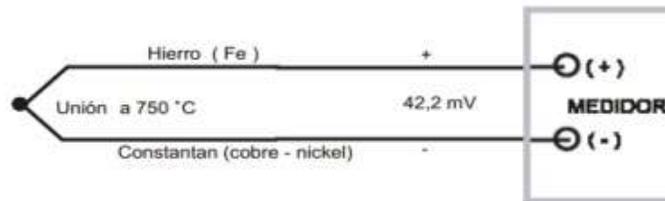


Figura 5. Diagrama de una termocupla tipo K.
Fuente: [8]

Tipos de Termocuplas

Existen una infinidad de tipos de termocuplas (Tabla 1), pero casi el 90% de las utilizadas son de tipo J o del tipo K. [8]

Tabla 1. Tipos de termocuplas y sus características.
Fuente: [8]

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

Uso típico de las termocuplas en la industria

Las termocuplas tipo J se usan principalmente en la industria del plástico, goma (extrusión e inyección) y fundición de metales a bajas temperaturas (Aluminio). La termocupla K se usa típicamente en fundición y hornos a temperaturas menores de 1300 °C, por ejemplo, fundición de cobre y hornos de tratamientos térmicos. Las termocuplas R, S, B se usan casi exclusivamente en la industria siderúrgica (fundición de acero). Finalmente, el tipo T eran usadas hace algún tiempo en la industria de alimentos, pero han sido desplazadas. [9]

Para el presente proyecto se emplearan termocuplas tipo K, misma que ya poseen algunos hornos que serán reacondicionados, este tipo de termocupla es la mejor opción ya que es la que más soporta altas temperaturas como lo es un tratamiento térmico o fundición. [9]

Materiales refractarios de para hornos.

Los materiales refractarios son materiales capaces de soportar elevadas temperaturas, resistir cargas mecánicas sin corroerse o debilitarse y soportan cambios de temperaturas también llamados o conocidos como choques térmicos, ataques químicos y abrasión.

Según Coinref [10], un material refractario es: “un elemento capaz de tolerar la labor del fuego sin deteriorarse”.

Morteros refractarios.

Los morteros refractarios son agentes refractarios ligantes, constituidos por una mezcla de compuestos refractarios finamente molidos, con agregados de otras sustancias que pueden no ser refractarias y que en estado húmedo se utilizan para adherir ladrillos o piezas refractarias. Consulte la Tabla 9 del Anexo I para más datos sobre los morteros refractarios.

Ladrillos refractarios.

Se utilizan para revestir hornos crematorios, hornos rotatorios, calderas, hornos de fundición y hornos de tratamiento térmico.

*Para mayor información véase la Tabla 7 del Anexo I.

De acuerdo con Conreif [10] los tipos de ladrillos refractarios son:

- ✓ Ladrillos de sílice: su compuesto es dióxido de silicio SiO_2 , el cuarzo es el material más usado para la fabricación de estos ladrillos. La temperatura de aguante es de 1700°C
- ✓ Ladrillos de chamota: contiene dióxido de aluminio y de sílice, es el material refractario para horno más utilizado.
- ✓ Ladrillos de andalucita: contienen una gran cantidad de alúmina, por ello se adaptan excelentemente a las variaciones de calor y frío, es una de las mejores opciones para hornos industriales.
- ✓ Ladrillos de mullita: además de mullita contiene un 80% de alúmina, la mullita refractaria se emplea en los hornos para vidrio y de silicato.
- ✓ Ladrillos de corindón: es el ladrillo que tiene más alúmina, es el ladrillo refractario más costoso, ideales para hornos de gran potencia. [10]

Fibra cerámica.

Se elabora a base de sílice y óxido de aluminio fundido y puede llevar otros óxidos (circonio, hierro, magnesio) en cantidades minoritarias. Estas fibras presentan una elevada resistencia a las temperaturas más altas, donde las lanas de aislamiento no son eficaces. Los usos de la fibra térmica son para hornos de tratamiento térmico, hornos de la industria cerámica, protección contra incendio y Chimeneas. [11] En la Tabla 10 del Anexo I puede encontrar algunas especificaciones.

Software SolidWorks

En la actualidad, SolidWorks ofrece una amplia gama de soluciones que incluyen fabricación inteligente, diseño y análisis, diseño eléctrico y electrónico, gestión de datos, proyectos y procesos. Estas soluciones brindan a las personas las herramientas que necesitan para abordar todos los aspectos del desarrollo de productos y optimizar el proceso de diseño e ingeniería. [12]

SolidWorks proporciona soluciones intuitivas para cada fase de diseño. Tiene un conjunto completo de herramientas para ayudarlo a mejorar la eficiencia y la productividad del desarrollo de productos en todos los pasos del proceso de diseño. [12]

Las 5 líneas de productos que ofrece SolidWorks son:

- I. Herramientas de diseño para crear modelos y ensamblajes
- II. Herramientas de diseño para la fabricación mecánica, que automatiza documentos de inspección y genera documentación sin planos 2D.
- III. Herramientas de simulación para evaluar el diseño y garantizar que es el mejor posible
- IV. Herramientas que evalúan el impacto medioambiental del diseño durante su ciclo de vida.
- V. Herramientas que reutilizan los datos de CAD en 3D para simplificar el modo en que las empresas crean, conservan y utilizan contenidos para la comunicación técnica. [12]

Capítulo 3

Planteamiento del problema

Identificación.

El consumo de aluminio serie 3xxx ha aumentado especialmente en las grandes potencias mundiales, esto conlleva a que últimamente la acumulación de aluminio ha crecido drásticamente conforme han pasado los años, por ende, la idea principal del estudio de construir un horno académico es utilizar el aluminio serie 3xxx que contienen las latas de bebidas carbonatadas de forma reciclable para reutilizarlo de forma útil para cuidar el medio ambiente y también en forma de negocio a nivel escolar. En los años que conlleva la carrera de Ingeniería Automotriz se señalan y conocen los procesos de fundición, dando énfasis al aluminio que es uno de los más usados en la industria automotriz. La segunda idea de la construcción de un horno académico fue estipulada para las actuales y futuras generaciones de la misma carrera, con el fin de que su uso sea didáctico y pongan en prueba los conocimientos de materias como Procesos de manufactura, Tecnología y comportamiento de los materiales y en el mejor de los casos, les sea de ayuda para proyectos de Titulación.

Justificación.

Gracias al estudio que permitió dar luz verde a la construcción del horno académico, los beneficios se extienden a toda la comunidad estudiantil del Tecnológico que desee o requiera hacer uso del horno para prácticas de fundición de metales con puntos de fusión menores a 800C° o tratamientos térmicos a distintas aleaciones ya que las muflas de la institución se encuentran en mal estado por falta de mantenimiento lo cual provoca fugas de calor en las pruebas.

Otros beneficios dentro del plantel:

- a) Mejora la experiencia al realizar prácticas de fundición.
- b) Facilita la realización de tratamientos térmicos.
- c) Prevé la saturación de alumnos para el uso de la mufla.
- d) Reduce desechos de aluminio dentro de la propia institución.
- e) Promueve proyectos de auto sustentabilidad para las demás carreras.

Alcance.

Se desarrollará un prototipo de horno académico que permita realizar prácticas de fundición y tratamientos térmicos a metales.

Se determinarán los respectivos cálculos para la construcción de la mufla.

La mufla será lo suficientemente eficiente para alcanzar las temperaturas requeridas para la fundición de la materia prima, en este caso el punto de fusión del aluminio es de 660 grados centígrados.

El proyecto se desarrollará para el uso de forma didáctica por parte de los alumnos de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices en el ITSUR.

Capítulo 4

Objetivos

Objetivos generales.

Analizar y diseñar la estructura y componentes de un horno académico para su uso como material didáctico en la institución.

Objetivos específicos.

Calcular y obtener resultados del análisis teórico para compararlos con un análisis experimental.

Seleccionar los materiales y componentes metálicos y no metálicos que formaran parte del horno.

Elaborar un modelado 3D.

Simular el comportamiento de las condiciones térmicas del horno.

Construir un prototipo del horno académico.

Integrar un controlador tipo PID para el manejo de las fases de temperatura del horno académico.

Desarrollar un sistema de recolección y tratamiento de material reciclado (aluminio).

Realizar pruebas de fundición a distintas temperaturas.

Realizar tratamientos térmicos a materiales metálicos.

Capítulo 5

Metodología

El siguiente trabajo se llevó a cabo dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato en los laboratorios de Manufactura, Maquinas eléctricas, LSA, Centro de computo, Biblioteca y Aulas del edificio B, en conjunto con 3 compañeros de la carrera de Ing. Sistemas Automotrices, uno de la especialidad de Manufactura en la Industria Automotriz y dos con especialidad en Tecnologías en la Industria Automotriz que, a su vez, permitió ampliar las áreas de conocimiento y así mismo complementando y uniendo las dos ramas de esta división de ingeniería, el proyecto inicialmente surgió con la necesidad de la liberación y acreditación de la materia de Residencias Profesionales en el periodo enero - junio del 2023.

Inicialmente, con ayuda de un asesor se plantearon las potenciales ideas para la creación de un proyecto dentro de la institución, teniendo en cuenta ciertos criterios a cumplir como lo fueron el incluir una idea innovadora dónde se aplicarán conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices, a su vez, que tuviera un impacto dentro de la escuela, es decir, que tuviera una aplicación y resolver una problemática previamente identificada por los propios alumnos de la coordinación, de ahí se derivaron otros campos de oportunidades, por ejemplo, la reducción de materia desechable dentro de la escuela y la posterior elaboración de una tesis profesional para obtener la titulación de Ing. Sistemas Automotrices.

Semana 1 y 2 (Planeación)

Se comenzó con la exhaustiva investigación acerca de las características, diseños, parámetros de seguridad, configuraciones y aplicaciones de los hornos eléctricos dentro de las industrias manufactureras y de procesos.

De acuerdo a la información recabada se establecieron los propios criterios de acuerdo a las necesidades dentro de la institución y posteriormente se comenzó con la búsqueda y selección de los materiales requeridos para la elaboración del horno.

Se cotizaron los costos de todo el material y herramientas a emplearse para establecer un margen económico y analizar la posibilidad para cubrir los gastos.

Para la adquisición de los materiales se recurrió al uso de plataformas digitales como www.amazon.com y www.mercadolibre.com.mx, dónde se encuentran en su totalidad los materiales.

Semana 3 y 4 (Diseño y dimensionamiento del horno)

Con base en una comparación realizada empíricamente se establecieron las medidas de un horno académico de acuerdo a las necesidades y parámetros acordados, dentro de ellos están: la cámara interna debe ser una cavidad cubica con medidas proporcionales, se necesita de una cámara de aire de 3cm de espesor con el fin de aislar más el calor, la compuerta puede ser deslizante o de bisagras dependiendo el diseño estipulado, la instalación del controlador es libre de posicionamiento pero debe estar próxima al horno, el uso del Crisol dependerá de las medidas de la cámara interna.

Para tener una representación se creó un dibujo 3D con ayuda del software SolidWorks® el cual permite elaborar diseños y simulaciones de distintas condiciones físicas, en este caso, requerimos de un dibujo a escala dónde se muestre la estructura del horno.

El diseño completo del horno consta de 6 piezas independientes las cuales se dibujaron de acuerdo a las medidas establecidas en las primeras semanas.

Pieza 1

La cámara principal del horno debe tener dimensiones internas de 40cm de ancho, 20cm de altura y 30cm de profundidad (Figura 6). El grosor de las paredes debe respetarse según el ladrillo utilizado, en este caso el ladrillo tiene dimensiones de 26cm de largo, 13cm de angostura y 6cm de altura.

El material se configuró y se seleccionó como nuevo material “Ladrillo” el cual debe ser creado desde cero de acuerdo a la ficha técnica del material a utilizar en el prototipo.

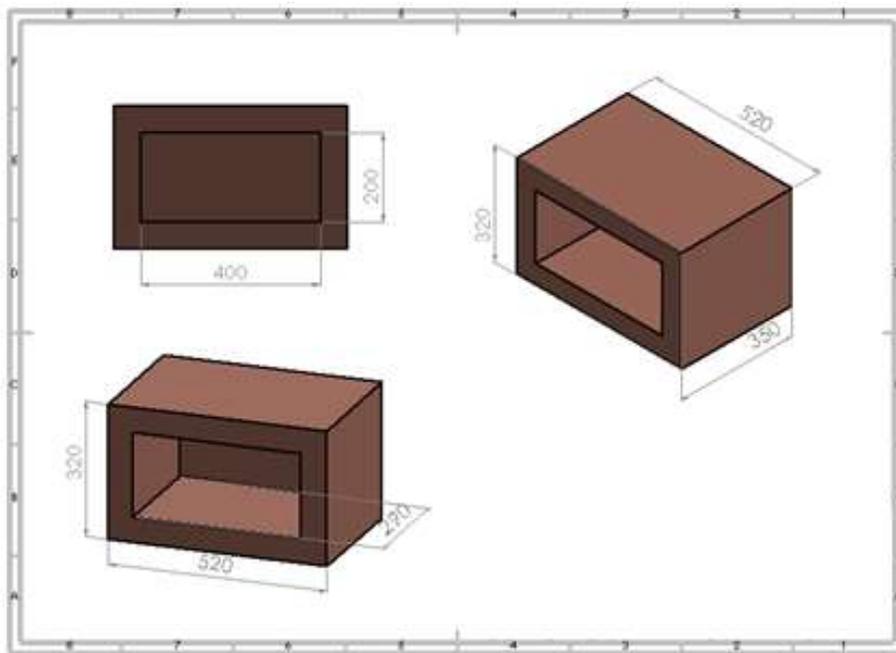


Figura 6. Modelado de la cámara principal del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Pieza 2

Con motivo de estética y cuestiones de seguridad se dibujó una carcasa de metal que cubrirá la cámara principal, esta debe tener las medidas externas de dicha cámara, es decir, 52cm de ancho, 32cm de altura y 35cm de profundidad, el grosor de la carcasa varía dependiendo el calibre de la lámina elegida (Figura 7).

Se eligió una aleación de acero de acuerdo a las posibilidades del equipo para financiarla.

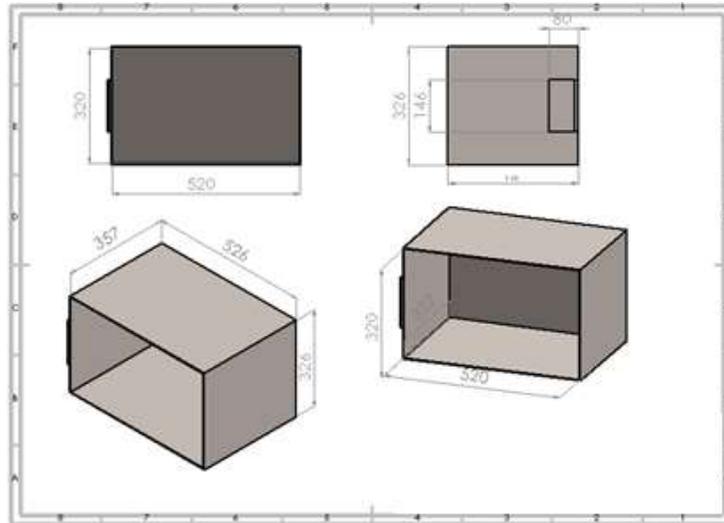


Figura 7. Modelado de la cubierta de metal del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Pieza 3

Se requirió de una puerta de metal con un mecanismo de bisagra para cerrar el horno, debe contar con la contraparte de la bisagra dibujada en la puerta y el material debe ser el mismo que el de la carcasa como se muestra en la Figura 8.

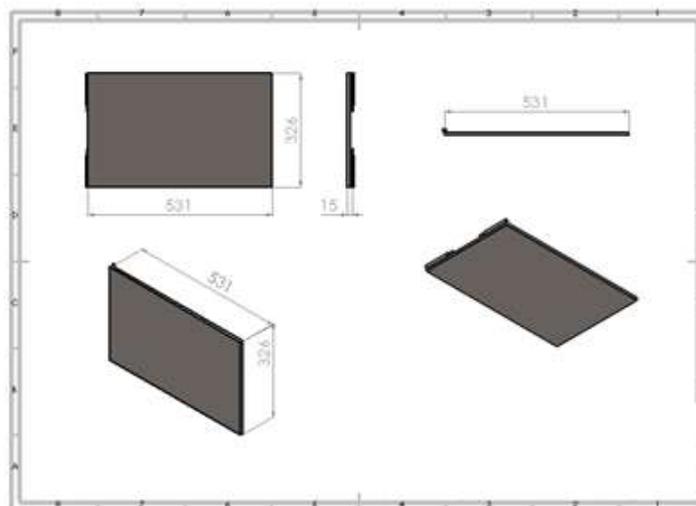


Figura 8. Modelado de la puerta de metal del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Pieza 4

Debido a las posibles fugas de calor se creó una pieza que funge como sellador hermético entre la puerta y la carcasa, esta pieza está hecha de ladrillo para compartir las mismas propiedades de la cámara interna (Figura 9).

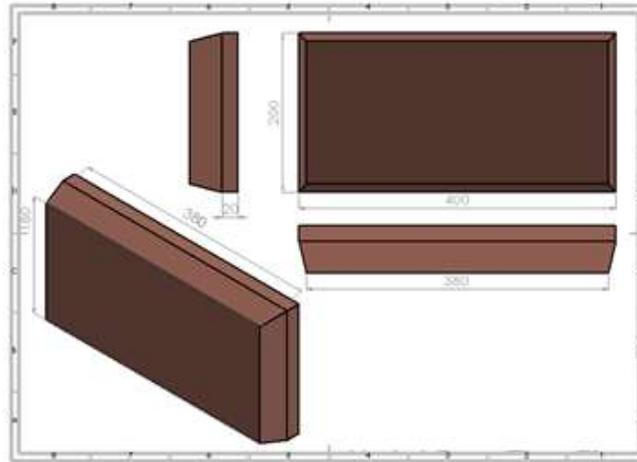


Figura 9. Modelado de un sello hermético para la puerta del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Pieza 5

Con el fin de dar estabilidad y soporte al horno, se crearon 4 soportes o patas en forma cilíndrica (Figura 10).

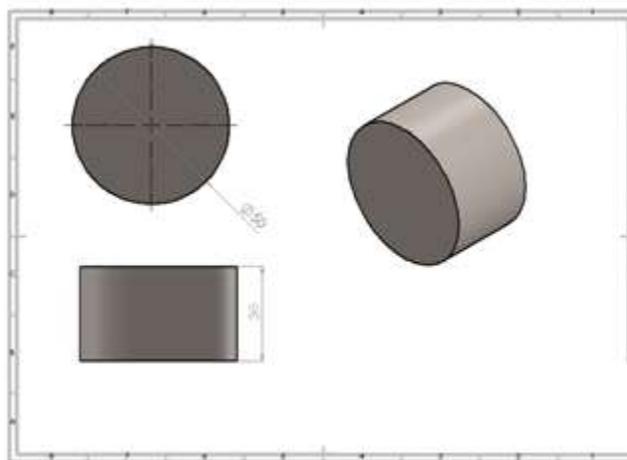


Figura 10. Modelado de los soportes del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Pieza 6

Como pieza funcional se creó una manija tubular que ayuda a obtener un óptimo funcionamiento y manejo de la compuerta (Figura 11).

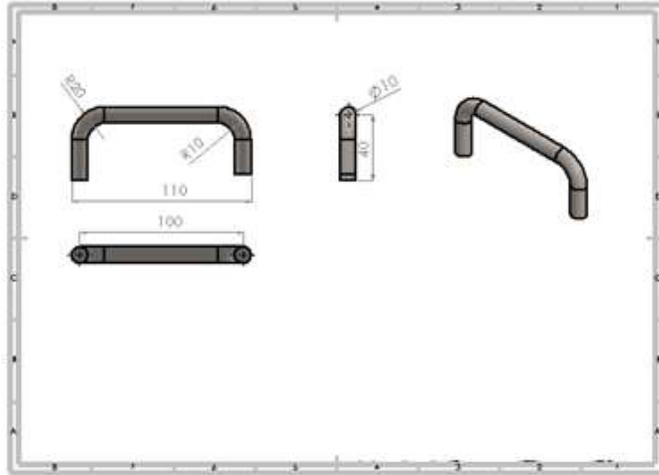


Figura 11. Modelado de una manija cilíndrica para la puerta del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Por último, se ensamblaron todas las piezas en sus respectivas posiciones y se obtuvo una sola pieza en 3D que se representa en la Figura 12.

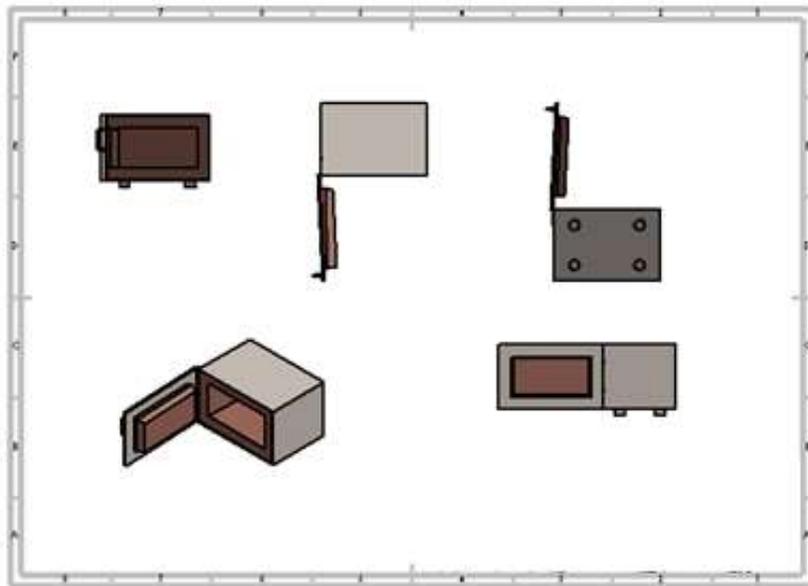


Figura 12. Modelado y vistas isométricas del ensamble final del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Semana 4 (Simulación Térmica)

Gracias a la representación y simulación se dictaminaron otros parámetros, como la posición de termopar dentro de la cámara principal, la posición óptima del crisol para aprovechar al máximo la energía calorífica y detectar las principales zonas donde se perderá más calor (Figura 13).

Dentro de la interfaz de SolidWorks podemos encontrar una serie de complementos con infinitud de funciones, en nuestro caso nos interesa el apartado de “Complementos de SolidWorks” en el menú principal, dentro de este podemos observar el apartado de “SolidWorks simulation”, después de dar clic en él se creará una nueva pestaña llamada “Simulation”, y posteriormente buscaremos el icono de una lupa con el nombre de “Nuevo estudio”, al abrirlo aparecerá un submenú y seleccionamos la opción de “Térmico”, creamos una nueva malla en nuestra pieza y por último establecemos la carga térmica en las caras de la pieza donde deseemos simular la distribución de calor y el valor en grados al que queremos llegar.

En la simulación se agregaron las cargas térmicas para saber la pérdida de calor a través de las paredes, en ella se demostró que las paredes exteriores se encuentran de color azul, la cual indica que está a temperatura ambiente mientras que la parte interior de la cámara esta de color rojo indicándonos que se encuentra a los 800 °C.

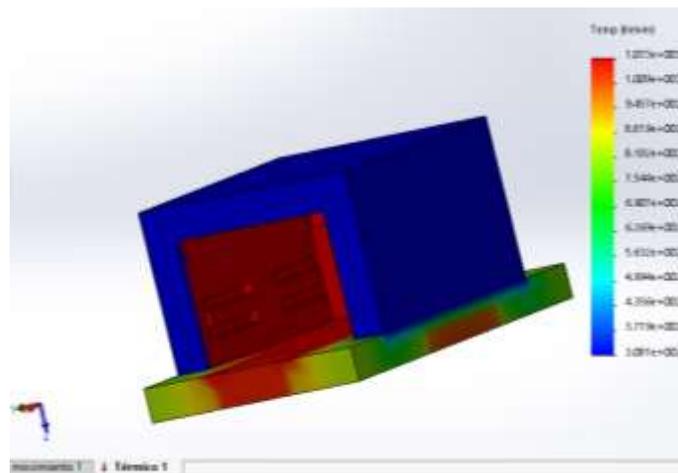


Figura 13. Simulación térmica.
Fuente: [Elaboración propia]

Semana 4 (Análisis teórico)

De acuerdo al modelado del horno académico tipo mufla se realizó un análisis teórico (Figura 14) con el fin de estipular una hipótesis sobre los coeficientes y el desempeño del prototipo físico del horno. Teniendo establecidos la serie de parámetros que conllevan a la correcta estructuración y funcionamiento se requirió el estudio de los tópicos de Transferencia de calor en paredes planas, convección, conducción, radiación y sistemas estacionarios.

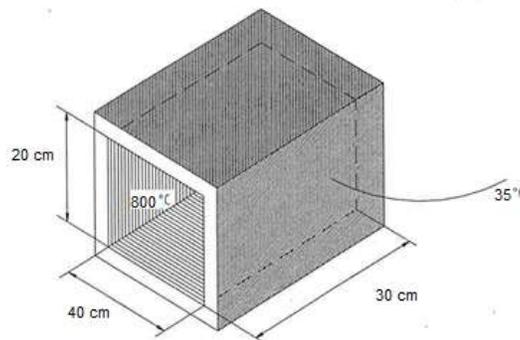


Figura 14. Boceto dimensionado de la cámara interna del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Con base en los teoremas y sus aplicaciones se llevó a cabo el siguiente desarrollo:

Datos:

Dimensiones del ladrillo refractario k23 = 22.86 cm x 11.43 cm x 6.35 cm

A= 2 paredes con dimensiones de 40 cm x 20 cm x 6.35 cm

B= 2 paredes con dimensiones de 20 cm x 30 cm x 6.35 cm

C= 2 paredes con dimensiones de 40 cm x 30 cm x 6.35 cm

T1 (Temperatura Pared Interior) = 800 °C.

T2 (Temperatura Pared Exterior) = 35 °C

Suposiciones:

Conductividades térmicas constantes

Perdidas de calor en los vértices despreciadas

Aplicación ideal de los coeficientes de los distintos materiales

Fórmulas:

$$Q = \frac{KA(T1 - T2)}{L}$$

Donde:

Q=Conducción de calor.

K= Conductividad térmica.

A= Área de la pared.

L= Longitud del tabique o material alrededor de la cámara interna.

Para condiciones de estado estacionario el flujo de energía a través de todas las paredes es igual a la energía que suministra el elemento calentador al horno, entonces, para la calcular la potencia para 2 paredes se utiliza la siguiente formula:

$$Q = \frac{2KA(T1 - T2)}{L}$$

Para las dos paredes A con dimensiones de 40 cm x 20 cm x 6.35 cm cada una con conductividad térmica a los 800 °C:

$$QA = \frac{2KA(T1 - T2)}{L}$$

$$QA = \frac{2(0.18)[(40 * 20)/10^4](800 - 35)}{(6.35/100)}$$

$$QA = 346.96 W$$

Para las dos paredes B con dimensiones de 20 cm x 30 cm x 6.35 cm cada una con conductividad térmica a los 800 °C:

$$QB = \frac{2KA(T1 - T2)}{L}$$

$$QB = \frac{2(0.18)[(20 * 30)/10^4](800 - 35)}{(6.35/100)}$$

$$QB = 260.22 W$$

Para las dos paredes C con dimensiones de 40 cm x 30 cm x 6.35 cm cada una con conductividad térmica a los 800 °C:

$$QC = \frac{2KA(T1 - T2)}{L}$$

$$QC = \frac{2(0.18)[(40 * 30)/10^4](800 - 35)}{(6.35/100)}$$

$$QC = 520.44 W$$

Ahora se suman los 3 resultados de las paredes para obtener el calor total requerido:

$$Qtotal = QA + QB + QC$$

$$Qtotal = 346.96 W + 260.22 W + 520.44 W$$

$$**Qtotal = 1127.62 W = 1.127 KW**$$

Con lo cual se estimó la energía calorífica requerida para el horno y así se tuvo una hipótesis teórica antes de desarrollar el prototipo.

Para el cálculo de la pérdida o absorción de calor dentro de la cámara hacia el aluminio dentro del crisol (Figura 15) se desarrolló lo siguiente:

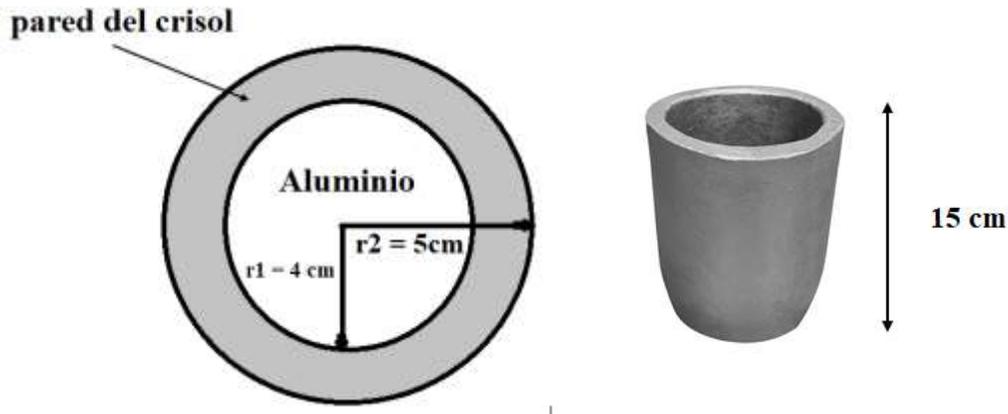


Figura 15. Dimensiones del crisol para la fundición.
Fuente: [Elaboración propia]

Se deben determinar la razón de la transferencia de calor por unidad de longitud y la caída de temperatura a través de la pared del crisol de carburo de silicio. Para ello se debe tomar en cuenta la transferencia de calor es estacionaria ya que no se tiene indicación de algún cambio con el tiempo, además, la transferencia de calor es unidimensional, puesto que se tiene simetría térmica con respecto a la línea central y no hay variación en la dirección axial, las conductividades térmicas son constantes y la resistencia por contacto térmico en la interface es despreciable, pero si debe contarse la transferencia de calor por radiación (Figura 16).

De esta manera se tienen los datos de las conductividades térmicas de los materiales involucrados:

Aluminio $k_1 = 205 \text{ W/m K}$

Carburo de silicio $k_2 = 130 \text{ W/m K}$

El Coeficiente de transferencia de calor para aire estancado $h = 0.026 \text{ W/m K}$

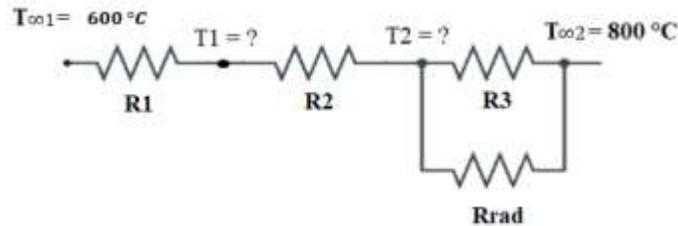


Figura 16. Diagrama de las resistencias en el sistema.
Fuente: [Elaboración propia]

Teniendo esto en cuenta se determina que las áreas de las superficies:

$$A_1 = 2\pi r_1 L = 2\pi (0.04\text{ m}) (0.15\text{ m}) = 0.003717\text{ m}^2$$

$$A_2 = 2\pi r_2 L = 2\pi (0.05\text{ m}) (0.15\text{ m}) = 0.004712\text{ m}^2$$

Asimismo, el coeficiente de transferencia de calor por radiación se expresa por:

$$h_{rad} = \varepsilon\sigma (T_2^2 + T_{\infty 2}^2)(T_2 + T_{\infty 2})$$

Tomando en cuenta la Constante de Stefan-Boltzmann:

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

Y el valor de $\varepsilon = 0.9$ de la tabla Emisividades de las superficies del anexo para el carburo de silicio se tiene:

$$h_{rad} = (0.9) \left(5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K}^4 \right) (933\text{ K}^2 + 1073\text{ K}^2) (933\text{ K} + 1073\text{ K})$$

$$h_{rad} = 20696.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K}$$

De esta manera cada una de las resistencias térmicas queda

$$R_1 = \frac{L_1}{k_1(A_1)} = \frac{0.04\text{ m}}{(205 \frac{\text{W}}{\text{m}} \cdot \text{K})(37.7 \times 10^{-3}\text{ m})} = 5.17 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_2 = \frac{L_2}{k_2(A_2)} = \frac{0.01 \text{ m}}{(130 \frac{\text{W}}{\text{m}} \cdot \text{K})(47.12 \times 10^{-3} \text{ m})} = 1.63 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{3\text{aireestancado}} = \frac{L_3}{h_{\text{aire}}(A_2)} = \frac{0.1 \text{ m}}{(0.0264 \frac{\text{W}}{\text{m}} \cdot \text{K})(47.12 \times 10^{-3} \text{ m})} = 81.6 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{h_{\text{rad}}(A_2)} = \frac{1}{(20696.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K})(47.12 \times 10^{-3} \text{ m})} = 1.025 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$\frac{1}{R_{\text{equi}}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{\text{rad}}} = \frac{1}{81.6 \frac{\text{K}}{\text{W}}} + \frac{1}{1.025 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}}} = 975.6 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$R_{\text{equi}} = 1.026 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2 + R_{\text{equi}} = 5.17 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}} + 1.63 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}} + 1.026 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{total}} = 7.83 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Entonces la razón de transferencia de calor estacionaria queda:

$$Q = \frac{(T_{\infty 2} + T_{\infty 1})}{R_{\text{total}}} = \frac{(1073 - 933) \text{ K}}{7.83 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}}} = 17879.9 \text{ W}$$

$$Q = \frac{\Delta T}{R} ; \Delta T = Q(R)$$

$$\Delta T = Q(R_2) = 17.979.9 \text{ W} \left(1.63 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}} \right) = 29.14 \text{ K} ;$$

$$T_1 = T_{\infty 2} - \Delta T = (1073 - 29.14) \text{ K} = 1043 \text{ K} = 770 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = Q(R_{\text{equi}}) = 17.979.9 \text{ W} \left(1.025 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}} \right) = 18 \text{ K} ;$$

$$T_2 = T_1 - \Delta T = (1043 - 18) \text{ K} = 1025 \text{ K} = 752 \text{ }^\circ\text{C}$$

Por lo tanto, tenemos:

$$Q = 17879.9 \text{ W}$$

$$T_{\infty 2} = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 781 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_1 = 770 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\infty 1} = 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Calculo de perdida de calor a través de las paredes compuestas del horno académico, véase la Figura 17:

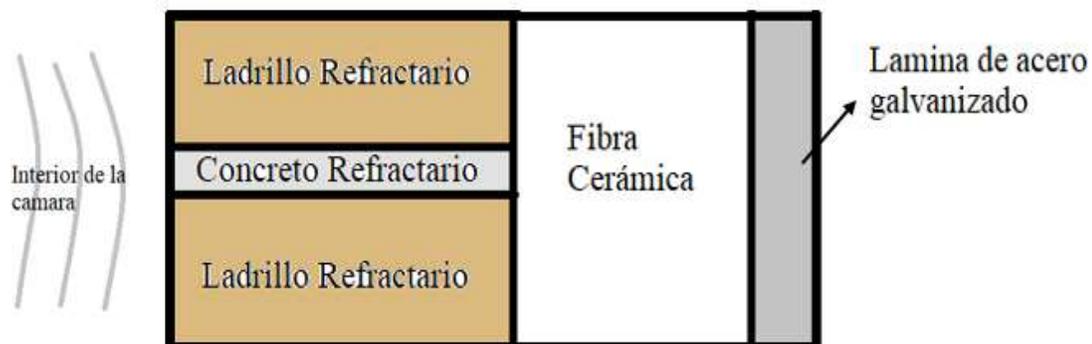


Figura 17. Diagrama de las paredes compuestas del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Se da la composición de una pared compuesta. Se debe determinar la razón de la transferencia de calor a través de la pared. Para ello se debe tomar en cuenta la transferencia de calor es estacionaria dado que no hay indicación de cambio con el tiempo, la transferencia de calor se puede considerar como si fuera unidimensional, ya que se realiza de manera predominante en la dirección, además que las conductividades térmicas son constantes y por último la transferencia de calor por radiación es despreciable.

Sus conductividades térmicas son:

Ladrillo refractario, $k_1 = 0.18 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,

Concreto refractario, $k_2 = 0.8 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,

Fibra cerámica, $k_3 = 0.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,

Lamina de acero galvanizado, $k_4 = 0.018 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,

Para el aire contenido dentro de la cámara $h_1 = 25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, mientras que para el aire al exterior de la cámara es $h_2 = 20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Además, las medidas de cada capa de la pared se muestran en la Figura 18.

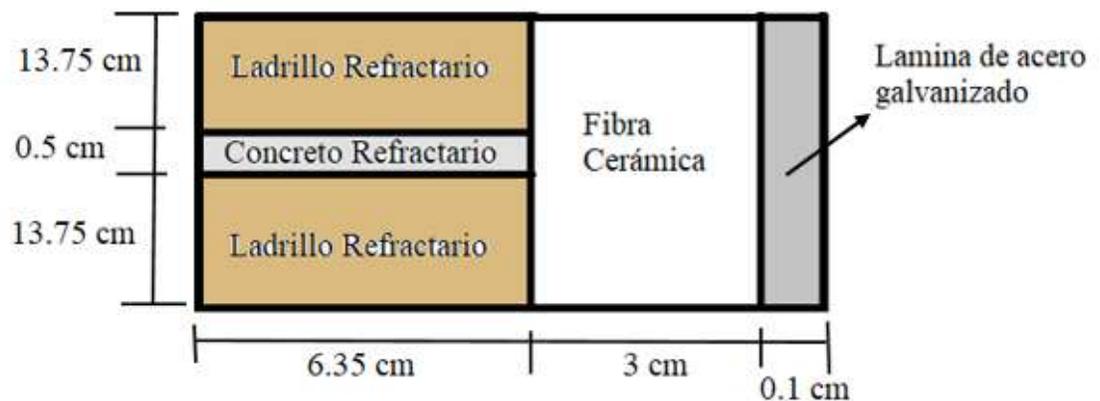


Figura 18. Dimensiones de las paredes del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Teniendo una profundidad de 32 cm.

Teniendo esto en cuenta se determina que las áreas de las superficies.

$$A_1 = (\text{altura de la pared})(\text{profundidad}) = (0.28 \text{ m})(0.32 \text{ m}) = \mathbf{0.0896 \text{ m}^2}$$

$$A_2 = (\text{altura del concreto})(\text{profundidad}) = (0.005 \text{ m})(0.32 \text{ m}) = \mathbf{0.0016 \text{ m}^2}$$

$$A_3 = (\text{altura del ladrillo})(\text{profundidad}) = (0.1375 \text{ m})(0.32 \text{ m}) = \mathbf{0.044 \text{ m}^2}$$

De esta manera tenemos el arreglo de resistencias total (Figura 19).

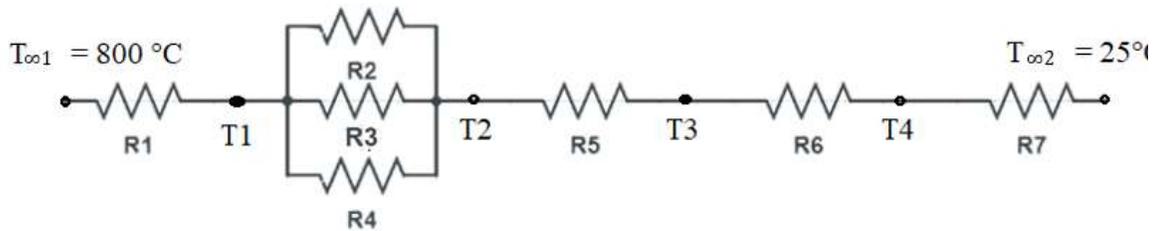


Figura 19. Diagrama final de resistencias.
Fuente: [Elaboración propia]

De esta manera cada una de las resistencias térmicas queda:

$$R1 = \frac{1}{h1(A1)} = \frac{1}{(25 \frac{W}{m^2} \cdot K)(89.6 \times 10^{-3}m)} = 0.446 \frac{K}{W}$$

$$R2 = R4 = \frac{L1}{k1(A3)} = \frac{0.0635 m}{(0.18 \frac{W}{m} \cdot K)(44 \times 10^{-3}m)} = 8.017 \frac{K}{W}$$

$$R3 = \frac{L1}{k2(A2)} = \frac{0.0635m}{(0.8 \frac{W}{m} \cdot K)(1.6 \times 10^{-3}m)} = 49.6 \frac{K}{W}$$

$$\frac{1}{R_{equi}} = \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} = \frac{1}{8.017 \frac{K}{W}} + \frac{1}{49.6 \frac{K}{W}} + \frac{1}{8.017 \frac{K}{W}} = 0.2696 \frac{W}{K}$$

$$R_{equi} = 3.709 \frac{K}{W}$$

$$R5 = \frac{L2}{k3(A1)} = \frac{0.03m}{(0.2 \frac{W}{m} \cdot K)(89.6 \times 10^{-3}m)} = 1.67 \frac{K}{W}$$

$$R6 = \frac{L3}{k4(A1)} = \frac{0.001m}{(0.018 \frac{W}{m} \cdot K)(89.6 \times 10^{-3}m)} = 0.62 \frac{K}{W}$$

$$R_7 = \frac{1}{h_2(A_1)} = \frac{1}{(20 \frac{W}{m^2} \cdot K)(89.6 \times 10^{-3}m)} = \mathbf{0.558 \frac{K}{W}}$$

$$R_{total} = R_1 + R_{equi} + R_5 + R_6 + R_7 = 0.446 \frac{K}{W} + 3.709 \frac{K}{W} + 1.67 \frac{K}{W} + 0.62 \frac{K}{W} + 0.558 \frac{K}{W}$$

$$R_{total} = 7.003 \frac{K}{W}$$

Entonces la razón de transferencia de calor estacionaria queda:

$$Q = \frac{(T_{\infty 1} + T_{\infty 2})}{R_{total}} = \frac{(1073 - 298) K}{7.003 \frac{K}{W}} = \mathbf{110.66 W}$$

$$Q = \frac{\Delta T}{R} ; \Delta T = Q(R)$$

$$\Delta T = Q(R_1) = 110.66 W \left(0.446 \frac{K}{W}\right) = 49.357 ;$$

$$T_1 = T_{\infty 1} - \Delta T = (1073 - 49.357)K = \mathbf{1023.6 K = 750^\circ C}$$

$$\Delta T = Q(R_1 + R_{equi}) = 110.66 W \left(0.446 \frac{K}{W} + 3.709 \frac{K}{W}\right) = 459.8 K ;$$

$$T_2 = T_{\infty 1} - \Delta T = (1073 - 459.8)K = \mathbf{613.2 K = 340^\circ C}$$

$$\Delta T = Q(R_1 + R_{equi} + R_5) = 110.66 W \left(0.446 \frac{K}{W} + 3.709 \frac{K}{W} + 1.67 \frac{K}{W}\right) = 644.2 K ;$$

$$T_3 = T_{\infty 1} - \Delta T = (1073 - 644.2)K = \mathbf{428.75 K = 155^\circ C}$$

$$\begin{aligned}\Delta T &= Q(R_1 + R_{equi} + R_5 + R_6) \\ &= 110.66 \text{ W} \left(0.446 \frac{\text{K}}{\text{W}} + 3.709 \frac{\text{K}}{\text{W}} + 1.67 \frac{\text{K}}{\text{W}} + 0.02 \frac{\text{K}}{\text{W}} \right) = 713.20 \text{ K};\end{aligned}$$

$$T_4 = T_{\infty 1} - \Delta T = (1073 - 713.2) \text{ K} = 359.8 \text{ K} = 86.8^\circ \text{C}$$

Por lo tanto, tenemos las temperaturas teóricas en cada parte de la pared compuesta del horno (Figura 20):

$$Q = 110.66 \text{ W}$$

$$T_{\infty 1} = 800^\circ \text{C}$$

$$T_1 = 750^\circ \text{C}$$

$$T_2 = 340^\circ \text{C}$$

$$T_3 = 155^\circ \text{C}$$

$$T_4 = 86.8^\circ \text{C}$$

$$T_{\infty 2} = 25^\circ \text{C}$$

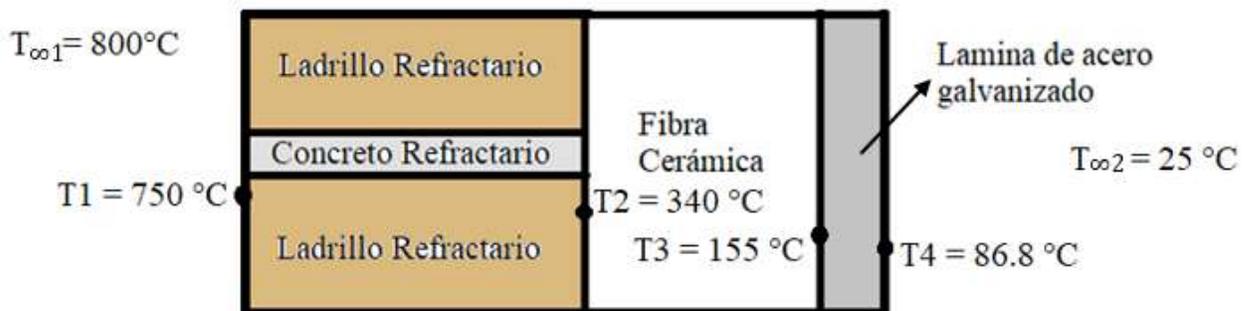


Figura 20. Temperaturas teóricas en la pared compuesta del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Semana 5, 6 y 7 (Pruebas de fundición)

Debido al tiempo establecido y las complicaciones para la adquisición de los materiales y productos destinados a la construcción del horno se optó por realizar pruebas de fundición del material reciclado, con el fin de aprovechar al máximo el tiempo y los recursos materiales disponibles.

Procesamiento de las latas

El proceso de fundición de las latas consta de 5 pasos a seguir presentados a continuación:

1. Recolección:

Se recolectaron una gran cantidad de latas de distintas bebidas energéticas, carbonatadas y cervezas (Figura 21).



Figura 21. Latas de refresco recolectadas.
Fuente: [Elaboración propia]

2. Selección y limpieza:

Se seleccionaron las latas en mejores condiciones, es decir, latas no aplastadas o con grandes abolladuras, ya que el estado de éstas retrasa considerablemente el tiempo del corte de las mismas.

Así mismo, se deben liberar de agentes contaminantes como son líquidos, suciedad o grasa, esto con el fin de reducir la producción de escoria en el material fundido.

3. Lijado o eliminación de pintura:

Se realizaron dos pruebas de fundición, una con el aluminio pintado y otra con el aluminio libre de pintura; de esta manera se llegó a la conclusión de que es mejor retirar la pintura de las latas ya que se reduce considerablemente la cantidad de escoria.

El proceso constó de lijar con una fibra abrasiva de grano alto el exterior e interior de las latas, evitar desprender el aluminio y sólo eliminar la ligera capa de pintura, posteriormente con ayuda de un agente químico, como puede ser “Tinner” o removedor de pintura, limpiar el exceso de suciedad del aluminio (Figura 22).



Figura 22. Lata cortada y posteriormente lijada y limpiada.
Fuente: [Elaboración propia]

4. Corte:

Con ayuda de una cortadora en forma de guillotina se procede a cortar las latas en pequeños trozos de aproximadamente 2cm x 2cm, para su posterior compresión, como se observa en la

Figura 23.



Figura 23. Latas trozadas por medio de una guillotina.
Fuente: [Elaboración propia]

5. Compresión:

Se requiere comprimir los trozos de lata con ayuda de una prensa hidráulica y un molde de metal (Figura 24).



Figura 24. Trozos de lata comprimidos por medio de una prensa hidráulica.
Fuente: [Elaboración propia]

Obteniendo así una mayor cantidad de volumen de aluminio por cada fundición (Figura 25).



Figura 25. Trozos de aluminio comprimidos en un crisol.
Fuente: [Elaboración propia]

Programación de la mufla

Se elaboró de un diagrama de fases establecido de acuerdo al proceso que se llevó a cabo, al material empleado y a las características de la mufla.

Se establecieron una serie de fases para la programación de la mufla y el límite en el aumento de la temperatura del horno, esto con motivo de no exceder los parámetros recomendados de la misma.

En este caso, una fundición de aluminio de acuerdo a las especificaciones que el proveedor indica la mufla no deberá aumentar más de 25°C/min, el punto de fusión del aluminio es de aproximadamente 660°C pero debido a las pérdidas de calor del sistema estacionario se compensó y estipuló a un límite de hasta 750°C.

En promedio se estima una temperatura de inicio de 25°C la cual es la temperatura ambiente (Figura 26), a lo largo de 33 minutos la temperatura comenzó a subir, llegó a los 650°C y se mantuvo así por 5 minutos. Posteriormente, durante 15 minutos volvió el aumento de temperatura, en esta ocasión con un promedio de 5°C/min hasta los 750°C y fue constante por 30 minutos para asegurar la fusión del metal.

Como última fase, comenzó el enfriamiento del horno, simplemente se dejó enfriar encendido y con la compuerta cerrada.



Figura 26. Primera fase del proceso de fundición del aluminio.
Fuente: [Elaboración propia]

Elaboración del molde y vertido

Es necesario disponer de un molde para su vertimiento, como se muestra en la Figura 27, la forma y el tipo de molde es opcional, en este caso se empleó un molde de arena con forma de engrane como prueba experimental.



Figura 27. Molde elaborado con arena.
Fuente: [Elaboración propia]

El vertido del aluminio fue rápido y con el equipo protección adecuado (Figura 28), debido a que se solidifica en cuestión de segundos; se requirió dejar enfriando la pieza por alrededor de 30 minutos y posteriormente fue retirada del molde.

Al retirar el exceso de arena de la pieza se requirió de la ayuda de una brocha común.



Figura 28. Vertido del material en estado líquido.

Fuente: [Elaboración propia]

IMPORTANTE: La mufla debe cerrarse inmediatamente después de retirar el crisol con el metal, al terminar el vertido el crisol debe introducirse de nuevo a la mufla para que comience con el proceso de enfriamiento, así mismo la mufla requiere enfriarse de manera automática con la compuerta cerrada, esto con el fin de no dañar las resistencias eléctricas y el crisol con un choque térmico accidental.

Semana 8 y 9 (Elaboración de un pre-prototipo del horno)

Debido a complicaciones y retrasos en cuestión del financiamiento del horno, se recurrió a la opción de crear un modelo a escala y con materiales alternativos con el fin de identificar posibles fallas, mejoras y obtener información, así como datos relevantes para el posible modelado final del prototipo.

El procedimiento se llevó a cabo bajo una serie de pasos mostrados a continuación:

Materiales:

- ✓ Ladrillo rojo recocido 28 cm x 14 cm x 7 cm (10 piezas)
- ✓ Mortero / cemento para construcción (5 kilogramos aprox.)
- ✓ Arena roja (7 kilogramos aprox.)
- ✓ Agua (según lo requerido)
- ✓ Recipientes de plástico
- ✓ Charola de acero
- ✓ Cuchara de albañilería
- ✓ Taladro y broca de 1/4"
- ✓ Lima o escofina para madera de 1/4"
- ✓ Resistencias eléctricas (Alambre Kanthal A1 calibre 23)
- ✓ Fuente de poder y conexiones
- ✓ Sensor de temperatura / cámara térmica

Prueba preliminar del alambre

Antes de comenzar con la elaboración del prototipo se realizaron pruebas al alambre debido a la hipótesis establecida, la cual fue el posible cortocircuitado de este mismo. Como sabemos, la resistencia del alambre dependerá también de su diámetro o mejor dicho calibre, el cual en este caso fue más pequeño de lo esperado. Obtenga más información en la Tabla 8 en el Anexo I.

Se optó por conectar un trozo de alambre a la fuente de poder y medir su resistencia antes del corto circuito del alambre (Figura 29).



Figura 29. Inducción de corriente al alambre a través de una fuente de voltaje.
Fuente: [Elaboración propia]

Para obtener un resultado más cercano al desempeño de una resistencia se realizó una prueba en un trozo de alambre de mayor tamaño (Figura 30).



Figura 30. Segundo trozo de alambre sometido a una corriente eléctrica.
Fuente: [Elaboración propia]

Construcción de un pre-prototipo

Paso 1:

Corte y ranurado de los ladrillos, un par de ladrillos requirieron de un corte para su colocación en la cámara del horno, el corte no necesita ser preciso ya que la cavidad puede ser rellenada posteriormente; con ayuda de una lima se procedió a realizar las ranuras en los ladrillos pertinentes con una distribución en “C” y a una profundidad aproximada de 6 milímetros (Figura 31), la distribución de las ranuras es libre siempre y cuando se respete una distancia mínima de 35 centímetros y máxima de 45 centímetros para las resistencias. El calor generado dependerá directamente del número de resistencias que se coloquen, en este caso, a medida de experimentación solo se colocaron tres, dos en las paredes laterales y una más en la parte superior de la cámara.



Figura 31. Ladrillo ranurado en forma "C".
Fuente: [Elaboración propia]

Paso 2:

Pre-colocación de los ladrillos (Figura 32), de acuerdo al modelo a escala del horno simulando las paredes de la cámara interna se colocaron los ladrillos de forma ordenada. Estos ladrillos fueron sumergidos previamente en agua para su correcta fijación en el proceso de unión y secado.



Figura 32. Pre-acomodo de los ladrillos ranurados.
Fuente: [Elaboración propia]

Paso 3:

Trenzado del alambre, para obtener las resistencias adecuadas se trenzó el alambre de modo que este tuviera una mayor masa y volumen, debido a que el calibre de este resultó ser demasiado delgado, por ende, se requirió de entre lazar una serie de trozos de alambre (Figura 33). Cabe mencionar que las pruebas preliminares del funcionamiento del alambre arrojaron los resultados donde este llegó a quemarse por la alta cantidad de corriente inducida que circuló a través de él.



Figura 33. Trenzado del alambre.
Fuente: [Elaboración propia]

La resistencia resultó ser muy blanda y fácil de doblar lo cual podría ser un problema a la hora de su acomodo en las ranuras (Figura 34).



Figura 34. Resistencia de alambre trenzado.
Fuente: [Elaboración propia]

Paso 4:

Inserción de las resistencias eléctricas, de forma cuidadosa se colocaron las resistencias en sus respectivas ranuras que posteriormente fueron sujetadas con ayuda de un trozo del mismo alambre Kanthal calibre 23 (Figura 35).



Figura 35. Incrustación de las resistencias a los ladrillos.
Fuente: [Elaboración propia]

Paso 5:

Preparación de la mezcla de mortero/arena/agua, con base en la experiencia personal y conocimientos de los integrantes del equipo se utilizaron las cantidades de 3kg de mortero x 5 kilogramos de arena roja x 5 litros de agua, cabe mencionar que las porciones no son exactas, ya que con la experimentación se fueron agregando y mezclando los materiales poco a poco hasta obtener una mezcla homogénea con una consistencia semilíquida.

Paso 6:

Construcción de la cámara principal, con ayuda de una cuchara de albañilería se vertió la mezcla de mortero entre los ladrillos y fueron colocados en sus respectivas posiciones, haciendo presión entre ellos para lograr un mejor acomodo y distribución del espacio, observe la Figura 36.



Figura 36. Aplicación de la mezcla y unión de los ladrillos.
Fuente: [Elaboración propia]

Paso 7:

El proceso de secado tardó un día completo, por lo que la estructura no entro en contacto ni se movió para evitar el desprendimiento de alguna pieza (Figura 37).



Figura 37. Estructura en reposo para el proceso de secado.
Fuente: [Elaboración propia]

Paso 8:

La perforación de los orificios para la colocación de las resistencias eléctricas se realizó en la parte trasera de la cámara mediante el taladrado y la broca teniendo en cuenta la posición de las ranuras en los ladrillos (Figura 38).



Figura 38. Terminales de las resistencias incrustadas en la cámara.
Fuente: [Elaboración propia]

Paso 9:

Conexión de las terminales de las resistencias a las fuentes de poder (Figura 39), las terminales fueron conectadas de manera independiente a diferentes fuentes de voltaje debido a que cada una entrega una cantidad relativamente baja de corriente a las resistencias.



Figura 39. Fuentes de poder suministrando energía a las resistencias.
Fuente: [Elaboración propia]

Semana 10 (Análisis de resultados y posibles mejoras al prototipo)

Con base en los resultados obtenidos de las pruebas realizadas se llegó a la conclusión de sustituir las resistencias de alambre Kanthal A1 por refacciones de resistencias para hornos eléctricos, esto con el fin de elevar la temperatura de la cámara interna hasta unos 400°C y comenzar con las pruebas de censo de temperatura.

Semana 11 (Sustitución de las resistencias eléctricas)

Primeramente, se realizaron las pruebas pertinentes del funcionamiento de las resistencias de horno eléctrico comerciales con ayuda de una fuente de poder, se le indujo corriente y se apreció que la potencia entregada no era suficiente, de modo

que se tuvieron que conectar directamente a la corriente eléctrica del laboratorio (Figura 40).

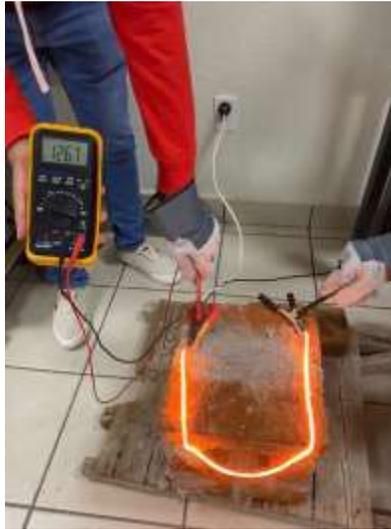


Figura 40. Voltaje entregado de la resistencia comercial.
Fuente: [Elaboración propia]

En este caso la lectura del amperaje es negativa por la polaridad inversa del multímetro, pero en realidad debería ser positiva (Figura 41).



Figura 41. Amperaje de corriente a través de la resistencia comercial.
Fuente: [Elaboración propia]

Se retiraron las resistencias inicialmente colocadas en el prototipo y se sustituyeron con las nuevas. Posteriormente se conectaron ambas resistencias de manera independiente y se notó un incremento de temperatura considerable.

Semana 12 (Incorporación de un termopar tipo K y prueba de funcionamiento)

Como medio para censar la temperatura se incrusto el termopar en la parte superior de la cámara principal del horno (Figura 42), con ayuda de la mezcla de mortero preparada el termopar se aseguró en la posición y a su vez se selló el orificio realizado para minimizar las pérdidas de calor.



Figura 42. Termopar incrustado en la cámara del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Por medio de un circuito creado a partir de un Arduino Uno y la implementación de su software (Figura 43) se comenzó a obtener temperaturas mostrando el correcto funcionamiento de las resistencias.

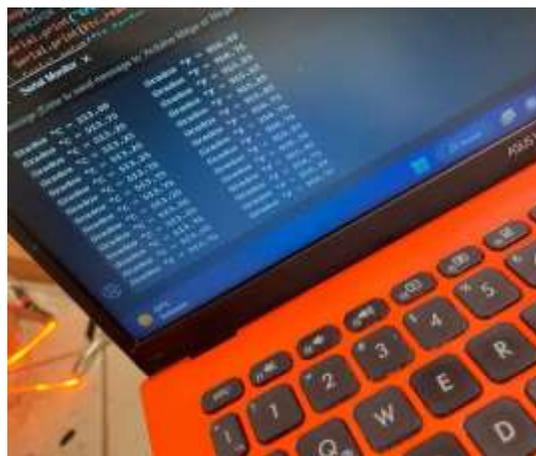


Figura 43. Interfaz de arduino mostrando las diferentes temperaturas censadas.
Fuente: [Elaboración propia]

Semana 13 y 14 (Elaboración del prototipo final)

Debido a las dificultades presentadas para la obtención de los materiales primeramente seleccionados se optó por utilizar ladrillos refractarios de distintas medidas, se modeló el horno académico tipo mufla en forma de caja rectangular con dimensiones interiores de 37.5 centímetros x 36.5 centímetros x 32 centímetros. La temperatura de la pared o cámara interior que se estima será de 800 °C, en cambio la temperatura de la pared exterior será aproximada a los 35 °C, en los cálculos se estimó la potencia que sería necesaria suministrar para mantener la condición de estado estacionario. Lo primero es saber que tenemos 3 parejas de paredes en el horno, en las cuales puede ocurrir transferencia de calor por conducción (Figura 44).

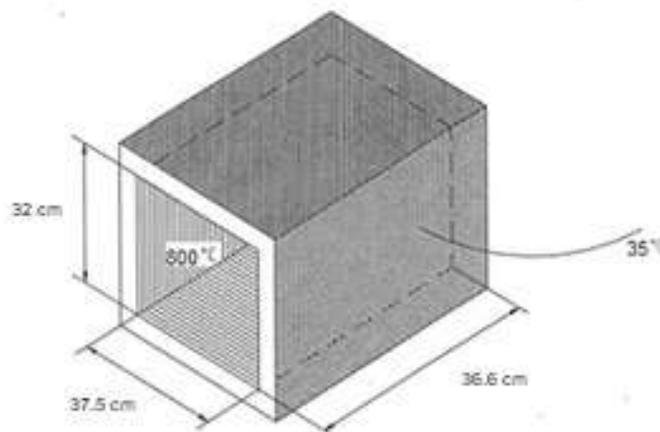


Figura 44. Nuevo diagrama de la cámara interna del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Datos:

Grosor ladrillo refractario k23 = 3 cm

A= 2 paredes con dimensiones de 37.5 cm x 32 cm x 3 cm

B= 2 paredes con dimensiones de 32 cm x 36.5 cm x 3 cm

C= 2 paredes con dimensiones de 37.5 cm x 36.5 cm x 3 cm

T1 (Temperatura Pared Interior) = 800 °C.

T2 (Temperatura Pared Exterior) = 35 °C

Suposiciones del horno:

El material de las paredes tiene conductividad térmica constante.

Se pueden despreciar los efectos de pérdida de calor a través de las aristas y las esquinas.

Formulas requeridas para el cálculo de la conducción de calor:

$$Q = \frac{KA(T1 - T2)}{L}$$

Q=Conducción de calor.

K= Conductividad térmica.

A= Área de la pared.

L= Longitud del tabique o material alrededor de la cámara interna.

L= 6.35 cm.

K (Conductividad térmica del ladrillo refractario k23) a distintas temperaturas:

400 °C = 0.14 [31]

600 °C = 0.16 [31]

800 °C = 0.18 [31]

1000 °C = 0.20 [31]

Para condiciones de estado estacionario el flujo de energía a través de todas las paredes es igual a la energía que suministra el elemento calentador al horno, entonces, para calcular la potencia para 2 paredes se utiliza la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{2KA(T1 - T2)}{L}$$

Para las dos paredes A con dimensiones de 40 cm x 20 cm x 6.35 cm cada una con conductividad térmica a los 800 °C:

$$QA = \frac{2KA(T1 - T2)}{L}$$

$$QA = \frac{2(0.18)[(37.5 * 32)/10^4](800 - 35)}{(3/100)}$$

$$QA = 1,101.6W$$

Para las dos paredes B con dimensiones de 20 cm x 30 cm x 6.35 cm cada una con conductividad térmica a los 800 °C:

$$QB = \frac{2KA(T1 - T2)}{L}$$

$$QB = \frac{2(0.18)[(32 * 36.5)/10^4](800 - 35)}{(3/100)}$$

$$QB = 1,072.22 W$$

Para las dos paredes B con dimensiones de 40 cm x 30 cm x 6.35 cm cada una con conductividad térmica a los 800 °C:

$$QC = \frac{2KA(T1 - T2)}{L}$$

$$QC = \frac{2(0.18)[(37.5 * 36.5)/10^4](800 - 35)}{(3/100)}$$

$$QC = 1,256.51 W$$

Ahora se suman los 3 resultados de las paredes para obtener el calor total requerido:

$$Q_{total} = QA + QB + QC$$

$$Q_{total} = 1,101.6 W + 1,072.22 W + 1,256.51 W$$

$$Q_{total} = 3,430.33 W = 3.430 KW$$

Con los resultados obtenidos en los análisis y las pruebas realizadas se llegó a la conclusión de comenzar con el prototipo final del horno, como primer paso se diseñó una base de metal la cual servirá como soporte para el horno, se eligió como material un perfil de acero de 1^{1/2} pulgadas debido al peso de los ladrillos, véase la

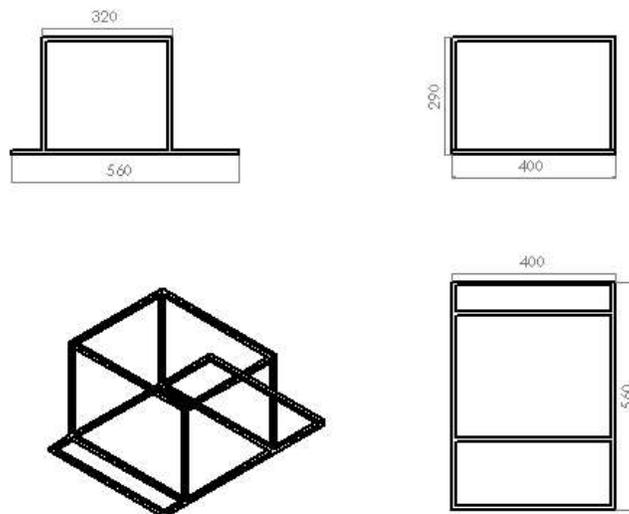


Figura 45.

Figura 45. Croquizado de la estructura de metal.
Fuente: [Elaboración propia]

Como siguiente paso se requirió acudir con un especialista a que manufacturara dicha estructura, ya que en la institución no se contó con la disponibilidad del material y las herramientas necesarias para elaborarla por cuenta propia.

Teniendo la estructura metálica se procedió con el acomodo preliminar de los ladrillos para tener idealizado el resultado de la cámara principal del horno (



Figura 46).

Figura 46. Pre acomodo de los ladrillos.

Fuente: [Elaboración propia]

Posteriormente se continuo con el marcado y ranurado de los ladrillos para colocar las resistencias más adelante (Figura 47).



Figura 47. Ranurado de los ladrillos.

Fuente: [Elaboración propia]

Siguiendo la metodología del primer prototipo, se pegaron los ladrillos con ayuda del mortero refractario (Figura 48) aplicándolo con una espátula de metal.



Figura 48. Unión de los ladrillos refractarios.
Fuente: [Elaboración propia]

Requirió de un par de horas para garantizar un buen secado y evitar riesgos de desprendimiento de alguna pieza (Figura 49).



Figura 49. Prototipo a la espera de secar.
Fuente: [Elaboración propia]

Después del secado, se continuo con la incrustación de las resistencias eléctricas en las ranuras pertinentes, el resultado se muestra en la Figura 50.



Figura 50. Resistencias instaladas en la cámara del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Debido a los problemas en cuanto la instalación eléctrica de la institución se recurrió a la posibilidad de sustituir las resistencias de alambre Kanthal calibre 12 por unas de calibre más bajo, como fueron las de calibre 18 mostradas en la Figura 51. Así mismo se perforó la parte superior de la cámara y se incrustó el termopar tipo K para las lecturas de temperatura.



Figura 51. Resistencias calibre 18 y termopar tipo K instalados.
Fuente: [Elaboración propia]

Las pruebas preliminares del desempeño de las resistencias se realizaron en el laboratorio de máquinas eléctricas con ayuda de una fuente de voltaje trifásica con

una potencia de hasta 220v y 30A de resistencia. Esto debido a la demanda energética de las propias resistencias (Figura 52).



Figura 52. Resistencias eléctricas en funcionamiento.
Fuente: [Elaboración propia]

Semana 15 (Prueba de fundición con el prototipo final)

Se estableció la conexión del horno a la fuente de voltaje y a su vez el termopar fue conectado a la interfaz de arduino (Figura 53) para monitorear la temperatura dentro de la cámara.



Figura 53. Conexión del prototipo final.
Fuente: [Elaboración propia]

Se colocó la viruta obtenida de las latas de aluminio dentro del crisol (Figura 54).



Figura 54. Crisol lleno de aluminio triturado.
Fuente: [Elaboración propia]

Se introdujo el crisol en el horno y se procedió a alimentar las resistencias eléctricas (Figura 55).



Figura 55. Comienzo de la prueba de fundición.
Fuente: [Elaboración propia]

Después de unos segundos el calor comenzó a aumentar y se cerró la cámara con ayuda de ladrillos refractarios y fibra cerámica (Figura 56).



Figura 56. Aislamiento de la cámara interna del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Al pasar el tiempo el calor comenzó a sentirse alrededor del horno, lo cual indicaba que la temperatura dentro de la cámara era relativamente alta a la del exterior aprox. 200°C (Figura 57).



Figura 57. Temperatura exterior de horno.
Fuente: [Elaboración propia]

La temperatura máxima obtenida en la prueba de fundición fue de aproximadamente 640°C como se muestra en la Figura 58, con lo cual no es suficiente para la fundición del aluminio debido a las pérdidas del calor dentro de la misma cámara.



Figura 58. Interfaz de arduino con las máximas temperaturas censadas.
Fuente: [Elaboración propia]

Se procedió a extraer el crisol y examinar el resultado de la fundición.

Como último paso se procedió a desconectar el horno de manera cuidadosa, con la finalidad de comenzar con el proceso de enfriamiento y evitar potenciales riesgos por las elevadas temperaturas (Figura 59).



Figura 59. Extracción del crisol y enfriamiento del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Capítulo 6

Resultados

Análisis teóricos

La potencia requerida por parte de las resistencias para lograr incrementar la temperatura hasta los 800°C en una cámara de 40cm x 20cm x30cm debe ser de 1.2 KW, a lo cual debe utilizarse resistencias que permitan soportar dicha potencia.

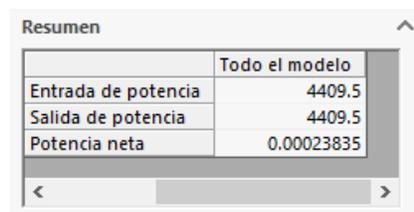
Para aumentar la misma temperatura, pero en una cámara con dimensiones de 32cm x 37.5cm x36.5cm se requiere una potencia de 1.6 KW que en este caso puede obtenerse de las mismas resistencias, pero es necesario incrementar el número de estas.

Todo el calor generado por estas fuentes no será el mismo que logre llegar al aluminio por lo que se debe compensar aumentando la temperatura máxima esperada, es recomendable tener alrededor de 100°C de margen extra.

Sabiendo que el calor será absorbido por las paredes del horno es necesario saber cuál será la temperatura que llegará a la parte exterior del horno y prever la manera de aislarla lo mayor posible.

Simulación térmica

Con la simulación se obtuvo los resultados de entrada, salida de potencia y potencia neta por toda la pieza de 4409.5 Kilowatts como se muestra en la Figura 60.



Resumen	
	Todo el modelo
Entrada de potencia	4409,5
Salida de potencia	4409,5
Potencia neta	0.00023835

Figura 60. Resultado de potencia de entrada en simulación.
Fuente: [Elaboración propia]

El software nos arroja los resultados de la potencia de entrada, la de salida y neta en las paredes compuestas de 4979.1 Kilowatts (Figura 61).



	Selección	Todo e
Entrada de potencia	4979.1	
Salida de potencia	4979.1	
Potencia neta	1.9729E-005	0

Figura 61. Resultado de la potencia de salida en simulación.
Fuente: [Elaboración propia]

La prueba de simulación solo es para rectificar la perdida de calor a través de las paredes ya que aún se deben establecer otros parámetros al igual que se debe considerar aislar completamente el horno con una compuerta y sus respectivos recubrimientos.

Procesamiento de latas

Las latas comprimidas y cortadas (Figura 62) agilizan el proceso de fundición ya que disminuyen el volumen del material y favorece la transferencia de calor entre él, así mismo aumenta la cantidad de material que se puede fundir en cada proceso y se aprovecha al máximo la capacidad del crisol.



Figura 62. Procesamiento de latas.
Fuente: [Elaboración propia]

Elaboración de un molde

Existen diferentes tipos de molde según el proceso que se requiera realizar, en este caso se requiere hacer un vertido de material y se optó por un molde abierto con la forma de un engrane y las siglas del ITSUR como se muestra en la Figura 63.



Figura 63. Molde de arena para fundición de aluminio.
Fuente: [Elaboración propia]

Pruebas de fundición

El diagrama de fases propuesto para la fundición de latas de aluminio según los parámetros de la mufla utilizada fue el mostrado en la Figura 64.

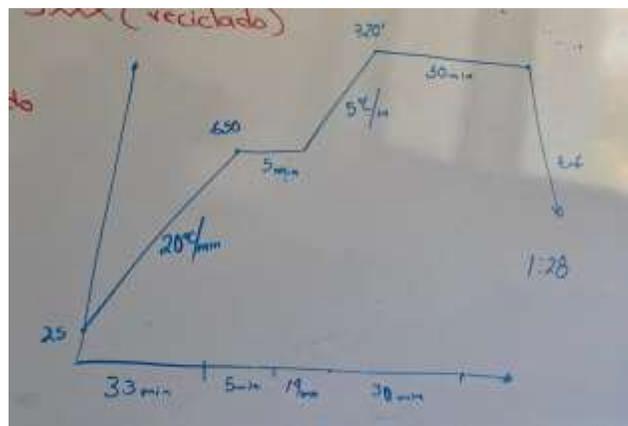


Figura 64. Diagrama de fases para fundir latas de aluminio.
Fuente: [Elaboración propia]

Después de 15 minutos el crisol dentro de la mufla alcanzó una temperatura de 300°C (Figura 65) teniendo un avance de aproximadamente 20°C/minuto.



Figura 65. Crisol a 300°C dentro de la mufla.
Fuente: [Elaboración propia]

En el primer resultado de la prueba de fundición a una temperatura máxima de 660°C se obtuvo que la temperatura no fue suficiente para derretir el metal (Figura 66), confirmando la hipótesis de las pérdidas de calor dentro de un sistema estacionario.



Figura 66. Aluminio a una temperatura estimada de 600°C.
Fuente: [Elaboración propia]

El material solidificado (Figura 67) y enfriado fue retirado del crisol dando como resultado una masa de aluminio comprimida donde aún se notaban los trozos de aluminio que no se derritieron en su totalidad.



Figura 67. Masa de aluminio solidificada.
Fuente: [Elaboración propia]

Se realizó una segunda prueba a una temperatura superior a los 800°C para garantizar la fundición del aluminio, véase la Figura 68.

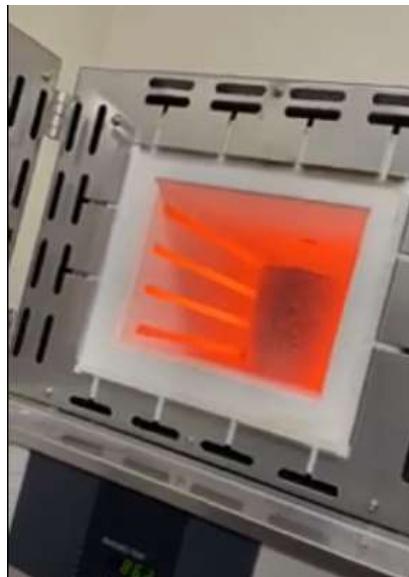


Figura 68. Crisol a 800°C dentro de la mufla.
Fuente: [Elaboración propia]

El resultado de la segunda prueba de fundición a una temperatura de 800°C fue exitoso (Figura 69), se logró fundir en su totalidad el material y se observó la formación de escoria en la superficie del material.



Figura 69. Aluminio obtenido de la fundición.
Fuente: [Elaboración propia]

Pruebas de resistencias eléctricas

Antes de comenzar con la construcción del prototipo se pusieron a prueba las resistencias eléctricas a distintas intensidades de corriente (Figura 70), los resultados obtenidos fueron únicamente para una resistencia bajo funcionamiento, véase la Tabla 2.



Figura 70. Resistencia eléctrica conectada a 120v.
Fuente: [Elaboración propia]

Pruebas de resistencias eléctricas (Resistencias comerciales)

Tabla 2. Desempeño de una resistencia eléctrica.
Fuente: [Elaboración propia]

Voltaje	Corriente	Temperatura	Resultados y observaciones
15 Volts (Fuente de voltaje)	3 Amperes	Baja, 40°C aprox.	Transferencia de calor poca, el alambre no fue calentado de manera uniforme al momento de someterlo a la corriente. Color: Naranja tenue.
25 Volts (Fuente de voltaje)	3 Amperes	Mediana, 80°C aprox.	Transferencia de calor factible, el alambre tuvo una mejor reacción a la corriente provocando que llegara a todo. Color: Naranja.
32 Volts (Fuente de voltaje)	3 Amperes	Mediana, 100°C aprox.	Transferencia de calor alta, el alambre comenzó a emitir luz por la corriente a la que fue inducido. Color: Naranja brillante.
120 Volts (corriente directa de la instalación eléctrica)	3 Amperes	Alta, 350°C aprox.	Transferencia de calor intensa, el alambre emitía tanto color que era perceptible a unos cuantos centímetros de distancia Color: Rojo vivo.

Construcción de un prototipo con materiales alternativos

Resultado del prototipo de horno con materiales alternativos usados debido a las complicaciones financieras del proyecto (Figura 71)



Figura 71. Vista frontal e isométrica del prototipo.
Fuente: [Elaboración propia]

Prueba de calentamiento del prototipo elaborado con materiales alternos

Las resistencias en funcionamiento lograron elevar la temperatura interna hasta una máxima de 500°C aproximadamente entre las 2, mostradas en la Figura 72, suponiendo que la cantidad de resistencias es insuficiente o en su caso, los materiales no logran mantener aislada dicha temperatura.



Figura 72. Prototipo en funcionamiento.
Fuente: [Elaboración propia]

Construcción del prototipo final

Prototipo del horno mufla (Figura 73) construido con los materiales adecuados como son los ladrillos refractarios, mortero refractario, estructura de metal y resistencias Kanthal calibre 12, financiados por los integrantes del equipo.



Figura 73. Prototipo final del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

La cámara principal del horno mufla terminó con 3 ranuras para las resistencias eléctricas, dos en las paredes laterales y una más en la pared del fondo como se puede observar en la Figura 74.



Figura 74. Cámara interna del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Prueba de calentamiento

La prueba preliminar de calentamiento mostro resultados prometedores elevando la temperatura por encima de los 100°C en pocos minutos (Figura 75).



Figura 75. Temperatura obtenida de la prueba de calentamiento.
Fuente: [Elaboración propia]

Después de alrededor de 30 minutos la temperatura censada fue de más de 400°C (Figura 76) a lo que se esperaba que alcanzaría la meta de 800°C, pero por cuestiones de tiempo se detuvo la prueba.



Figura 76. Temperatura obtenida después de 30 minutos.
Fuente: [Elaboración propia]

Prueba de fundición

De acuerdo a lo obtenido en la prueba de calentamiento se esperaba que la prueba de fundición llegara a ser posible, pero al contrario los resultados no fueron los mejores (Figura 77).



Figura 77. Virutas de aluminio no fundidas.
Fuente: [Elaboración propia]

Capítulo 7

Análisis de Resultados

Análisis teóricos e hipótesis planteadas

El primer dato requerido para el desarrollo de este proyecto fue la potencia calorífica requerida para el óptimo desempeño del horno, esta potencia sería entregada directamente de las resistencias eléctricas de alambre Kanthal, la cual se logró calcular mediante los principios y teoremas de la transferencia de calor. Con lo cual se obtuvo que el resultado teórico de 1.127 KW es la potencia requerida para elevar la temperatura hasta 800°C bajo las dimensiones planteadas de 20cm x 30cm x 40cm, posteriormente este fue comparado con el valor obtenido bajo la práctica de 1.2 KW que resulto directamente proporcional al tipo de resistencias, en este caso las de alambre Kanthal calibre 18, obteniendo así la hipótesis que el estudio realizado era correcto y que la diferencia podría depender de las fugas de calor y las pérdidas absorbidas por los componentes del horno.

Teniendo así, que las principales pérdidas fueron el calor absorbido por el crisol, la temperatura absorbida por las paredes del horno y la radiación a través del aire dentro de la cámara, esto quiere decir que la energía entregada por las resistencias no sería aprovechada al 100%. Y en el cálculo teórico arrojó que la pérdida de temperatura absorbida únicamente por el crisol es de alrededor de 50°C sin contar las otras pérdidas dentro del sistema.

Sabiendo que el calor generado por las resistencias no será el mismo que llegará al material dentro del crisol se debe tomar en cuenta la necesidad de aumentar la temperatura total dentro de la cámara, esto con el fin de garantizar un buen proceso de fundición o tratamiento térmico en su caso, solamente el crisol absorbe más de 50°C (dependiendo el material y el tamaño del mismo), a lo cual también debe considerarse el calor que se absorbe a través de las paredes, el que se fuga por los orificios y el mismo que irradia a través del aire dentro de la cámara, siendo así, que entre más alejado esté el material de las resistencias más será la pérdida del calor

y se deberá incrementar el valor de la temperatura estimada dentro de la cámara. Siendo esta la razón del porque se estableció una temperatura de 800°C y no de 660°C como se podría esperar por ser el punto de fusión del aluminio.

Las temperaturas en cada parte del horno dependerán siempre de la conductividad térmica de cada material, en el análisis y diseño planteado se puede observar que en la pared externa del ladrillo refractario la temperatura aun es alta, 340°C aproximadamente, la fibra cerámica reduce más de la mitad este calor (155°C) y la lámina que recubre el horno apenas tiene una temperatura estimada de 86°C a lo cual debe considerarse aún que estará disminuyendo por el contacto con el aire del exterior y ya no será una superficie riesgosa a quemaduras.

Procesamiento de latas y pruebas de fundición

Como parte del conocimiento experimental adquirido acerca del procesamiento de las latas y las posteriores pruebas de fundición se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- I. El lijado y limpiado de las latas es muy laborioso y tardado, por lo que se requiere de un mecanismo que facilite este proceso.
- II. El corte de las latas requiere también de tiempo y lo óptimo podría ser la implementación de un mecanismo de corte diferente.
- III. Es de gran importancia la compresión de los trozos de lata debido a que es un material relativamente bajo en densidad y se requiere de una gran cantidad de materia para obtener una mayor concentración de aluminio puro por cada fundición.
- IV. El aluminio obtenido de las latas no procesadas (Figura 78) y las procesadas (Figura 79) tiene como principal diferencia la cantidad de escoria que se forma en la superficie del crisol.



Figura 78. Fundición de latas no procesadas.
Fuente: [Elaboración propia]

- VI. Se recomienda siempre someter las latas a los procesos de selección, limpieza y corte evidenciados en la metodología de este trabajo.



Figura 79. Fundición de latas procesadas.
Fuente: [Elaboración propia]

- V. Las muestras de aluminio obtenidas de las respectivas fundiciones son aparentemente idénticas en cuanto a sus propiedades y a su apariencia (Figura 80), la única diferencia perceptible fue la cantidad de escoria como antes se mencionó.



Figura 80. Muestras obtenidas de las fundiciones.
Fuente: [Elaboración propia]

Prueba de calentamiento del prototipo con materiales alternos

Las pruebas de calentamiento realizadas al prototipo elaborado con materiales alternos arrojaron la siguiente información:

- I. El calor generado por las resistencias eléctricas no será suficiente para fundir aluminio debido a las pérdidas de calor y al número de resistencias instaladas (3), por lo que se requiere aislar la cámara del prototipo y a su vez aumentar la cantidad de resistencias (Figura 81).
- II. La temperatura máxima censada fue de 479°C con la compuerta cerrada.

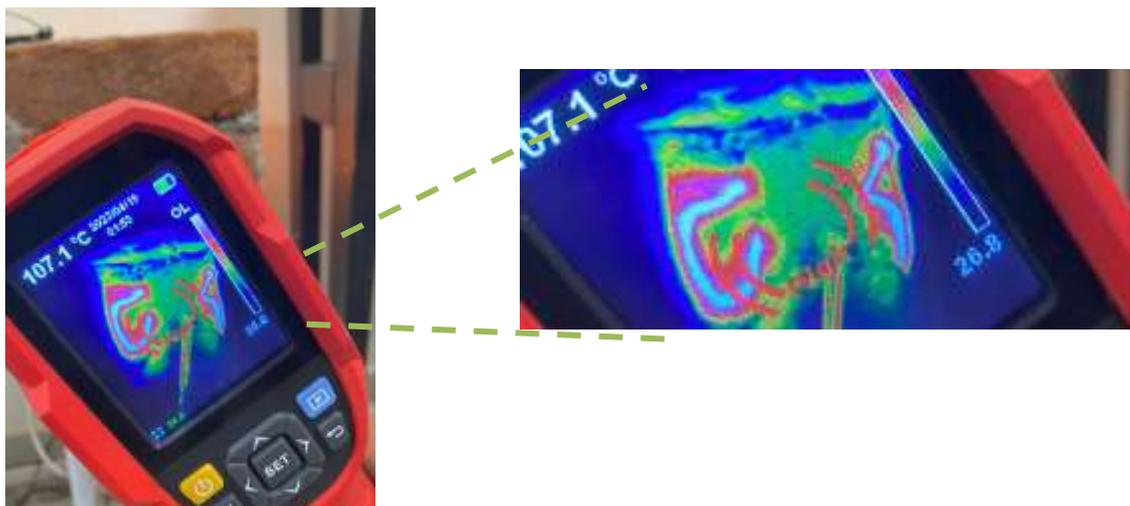


Figura 81. Temperatura obtenida con una pistola térmica.
Fuente: [Elaboración propia]

- III. La temperatura alcanzada es demasiado baja para realizar la fundición de aluminio; el principal problema viene de la poca cantidad de calor que generan las 3 resistencias, sumado a su vez, dicho calor no es retenido por las paredes del prototipo, al ser un material de alta conductividad térmica permite el paso de la temperatura a través de él y, por ende, esta se pierde en el espacio alrededor.

Materiales seleccionados vs materiales alternos (comparación)

El desempeño de los morteros, ladrillos refractarios y resistencias se muestra en la Tabla 4, Tabla 4 y Tabla 5 respectivamente, dónde se exponen algunas de sus propiedades, su comportamiento y observaciones, así como otros datos relevantes.

Tabla 3. Cuadro comparativo entre los tipos de ladrillos utilizados.
Fuente: [Elaboración propia]

Mortero	
Refractario	Para construcción
<p>Fungió como un aislante extra, permitió una unión sólida y resistente entre los ladrillos, además de tener un secado rápido de alrededor de 45 minutos para poder manejar la estructura sin riesgo a desprenderla.</p> <p>Al igual que los ladrillos, soporto sin problemas los 800°C y redujo el calor transmitido a la superficie exterior.</p> <p>Se puede comercializar preparado lo que facilita su uso, solo basta de mezclar bien antes de aplicar.</p> <p>Su precio en internet es de 700.00 MXN por 8kg.</p>	<p>Su preparación es más laboriosa, además que el secado es más tardado (un día completo como mínimo). Contrario a lo esperado, la adhesión no es la mejor ya que la mezcla no es la misma que para construcción, por ende, resultó en una unión frágil.</p> <p>Añadiendo también el agrietamiento por la elevada temperatura el prototipo se colapsó poco después de su uso.</p> <p>Para su preparación se requiere de arena y agua, lo cual aumenta los tiempos de preparación y costos.</p> <p>El costo de preparación varía dependiendo la marca de mortero, la cantidad utilizada y la consistencia requerida.</p>

Tabla 4. Cuadro comparativo entre los tipos de ladrillos utilizados.
Fuente: [Elaboración propia]

Ladrillos	
Refractario K23	Rojo recocido
<p>Soportó temperaturas superiores a 800°C sin agrietarse y sin presentar daño alguno, además impidió el paso del calor a través de él ya que en la superficie exterior se percibían 35°C aprox.</p> <p>Es frágil pero no demasiado como para desmoronarse, el ranurado y corte fue duro, pero se obtuvieron buenos resultados.</p> <p>Como contraparte es el uso de material de protección especial, ya que el ladrillo contiene algunos materiales potencialmente tóxicos.</p> <p>Sus dimensiones son la mitad de su competencia, pero su peso es casi $\frac{3}{4}$ partes similar por lo que se puede confirmar que es de mayor densidad.</p> <p>El precio por pieza es de alrededor de 90.00 – 120.00 MXN.</p>	<p>Su resistencia máxima a la temperatura fue de alrededor de 600°C antes de comenzar a agrietarse, el calor traspaso con relativa facilidad ya que se percibían más de 50°C en la superficie exterior.</p> <p>Su corte y ranurado es un porciento más sencillo por ende es más frágil y puede desmoronarse con mayor facilidad.</p> <p>No requiere de equipo de protección especial.</p> <p>Es el doble de alto que el refractario y más ligero en proporción.</p> <p>Su valor en el mercado es de aprox. 3.00 – 5.00 MXN.</p>

Tabla 5. Cuadro comparativo entre los tipos de resistencias utilizadas.
Fuente: [Elaboración propia]

Resistencias		
Kanthal A1 calibre 12 (AWG)	Kanthal A1 calibre 32 (AWG)	Resistencias comerciales
<p>Requiere de una conexión a corriente trifásica por su alto consumo energético.</p> <p>En el mejor de los casos puede obtenerse una potencia de 1600W</p> <p>Su resistencia es de 0.328 ohm/m</p> <p>Diámetro de 2.05 mm</p> <p>Composición: 80% níquel – 20% cromo.</p>	<p>Se puede conectar a una fuente de poder debido a su baja demanda en el consumo de energía.</p> <p>Debido a su bajo calibre la potencia es insignificante a menos que se entrelacen una serie de trozos de alambre y esta dependerá de la cantidad de los mismos.</p> <p>La resistencia es de 2.346 ohm/m</p> <p>Diámetro de 0.2 mm</p> <p>Composición: 80% níquel – 20% cromo.</p>	<p>Es necesario de al menos conectarse a una corriente de 120v para obtener un buen desempeño.</p> <p>Puede tener una potencia de hasta 1300W con la instalación y recursos adecuados.</p> <p>Resiste 0.833 ohm/m</p> <p>Diámetro de 1.29 mm</p> <p>Composición: 80% níquel – 20% cromo.</p>
<p>Todos resisten la corriente desde 0v – 220v, pero su integridad dependerá de la intensidad de la corriente.</p> <p>Su punto de fusión oscila los 1200 – 1400 °C</p>		

Pruebas de calentamiento

Los resultados obtenidos en la prueba de calentamiento se resumieron en la Figura 82 para facilitar la interpretación de los datos, ya que se configuró el código de arduino para censar las temperaturas cada 333 milisegundos, es decir, 3 veces por segundo debido a que el termopar tenía una resolución baja, de 0.25 °C por iteración.



Figura 82. Gráfica Iteración-Temperatura.
Fuente: [Elaboración propia]

El calor acumulado dependió directamente de la potencia suministrada a las resistencias, en la se muestra una gráfica de barras dónde es apreciable el aumento de temperatura de acuerdo a el voltaje que se indicó (Figura 83).



Figura 83. Gráfica Voltaje - Temperatura.
Fuente: [Elaboración propia]

Otra manera de interpretar los resultados se muestra en la Tabla 6, dónde ahora se puede apreciar el tiempo exacto transcurrido en horas/minutos/segundos.

Tabla 6. Voltaje - Tiempo - Temperatura.
Fuente: [Elaboración propia]

Voltaje suministrado (V)	Tiempo transcurrido (hrs)	Temperatura alcanzada
60	00:00:00	23 °C
60	00:07:38	85.381 °C
70	00:18:13	171.8905 °C
70	00:36:04	317.8385 °C
80	00:55:35	477.322 °C
80	01:05:48	560.889 °C
90	01:11:17	605.615 °C
90	01:15:49	640.925 °C

Se estuvo analizando el horno de manera periodica con la pistola térmica a manera de comparación con las lecturas obtenidas por el termopar (Figura 84).



Figura 84. Lectura de la temperatura del horno.
Fuente: [Elaboración propia]

Pruebas de fundición

Como se puede observar en la Figura 85 el aluminio no logró fundirse, debido al calor insuficiente dentro de la cámara y en conjunto a esto, la fuga del calor a través de las paredes y abertura del horno. El aluminio solo redujo su volumen dentro del crisol, compactándose al fondo y cambiando de apariencia. Resultado similar a la primera prueba de fundición vista en la Figura 66.



Figura 85. Resultado de aluminio a temperatura ambiente.
Fuente: [Elaboración propia]

Al igual que con el horno se realizó un análisis de temperatura con la pistola térmica, en este caso se capturo en el proceso de enfriamiento de éste Figura 86.



Figura 86. Captura de análisis térmico al crisol con el material dentro.
Fuente: [Elaboración propia]

Capítulo 8

Conclusiones y trabajo a futuro

De acuerdo a los resultados obtenidos se llegó a la conclusión que el prototipo final del horno permite realizar fundiciones y tratamientos térmicos que entran en un rango máximo de temperatura de 641°C, por lo que se puede decir que no se cumplió el objetivo general al 100% debido a la limitante principal del uso de resistencias de bajo calibre, las cuales fueron utilizadas por las complicaciones de financiamiento, las limitantes presentadas en la institución, como fueron las instalaciones eléctricas de baja resistencia y el poco acceso a fuentes de alto voltaje, así como a la falta de tiempo para realizar los ajustes pertinentes del prototipo.

Existe una amplia área para trabajar y continuar con el desarrollo e innovación del presente proyecto, como lo es principalmente la búsqueda del aumento en la temperatura dentro de la cámara principal del horno, esto con el fin de aumentar las posibilidades de uso de dicho horno, es decir, permitir realizar fundiciones a otros materiales con puntos de fusión mayor a los 800°C como pueden ser el acero y algunas aleaciones ferrosas que comúnmente se utilizan dentro de la industria automotriz. Otro punto importante a mejorar es aumentar el aislamiento térmico de la cámara ya que como se pudo observar, la temperatura en la superficie exterior resulto relativamente alta, lo cual podría llegar a causar accidentes en los usuarios.

Como parte del trabajo en conjunto con alumnos de la carrera de Ing. Sistemas Automotrices se pensó en la incorporación de un controlador PID que permita el manejo y programación de las fases que se manejan en los distintos procesos de fundición y tratamientos térmicos, dicho controlador debe permitir el control total de la potencia entregada de las resistencias eléctricas, así como permitir establecer tiempos prolongados manteniendo una potencia constante, y como manera de innovación a algunos modelos de muflas comerciales, que tenga la facilidad de

implementar un sistema de enfriamiento automático para optimizar los tiempos de uso del horno.

A futuro podría ser la comercialización de barras de aluminio como material didáctico para otras instituciones educativas de la zona, realizando convenios con las preparatorias que ofrezcan carreras con actividades curriculares o talleres de manufactura, fomentando el uso y la práctica de máquinas herramienta, así como reduciendo la cantidad de desechos que tiene un doble impacto, tanto educativo como autosustentable pensando en la situación que vivimos actualmente con las problemáticas medioambientales.

Referencias bibliográficas

Bibliografía

- [1] J. Astigarraga, Hornos Industriales de Inducción, McGraw-Hill Interamericana, 1994.
- [2] Y. Cengel, Transefrecencia de calor y masa: un enfoque práctico, 3 ed., McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [3] A. & O. G. A. Echavarría, Metalurgia básica de algunas aleaciones de aluminio extruidas o laminadas., Revista Colombiana de Materiales, 2012.
- [4] K. Valverde., «Fundición de aluminio por gravedad: qué es y en qué consiste,» Funvalles, 21 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://funvalles.com/fundicion-de-aluminio-por-gravedad-que-es-y-en-que-consiste/>. [Último acceso: 08 Abril 2023].
- [5] A. B. José., Tratamientos térmicos de los aceros, Decima ed., Madrid: Dossat, 1980.
- [6] F. Diaz, «Tratamientos térmicos.,» UNAM, 2012. [En línea]. Available: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/aceros%20estructuras%20y%20tratamientos%20termicos.pdf. [Último acceso: 08 Abril 2023].
- [7] Anonimo, «El aluminio y sus tratamientos térmicos,» Distribuidora de aluminio, 10 Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://distribuidoradealuminio.net/blog/el-aluminio-y-los-tratamientos-termicos/>. [Último acceso: 06 Abril 2023].
- [8] Dingelme, «¿Qué son y cómo funcionan las termocuplas?,» Dingelme proyectos y maquinaria , 2020. [En línea]. Available:

- <https://dingelmepym.com/que-son-y-como-funcionan-las-termocuplas/>. [Último acceso: 08 Abril 2023].
- [9] E. Industria, «"Termocuplas: Fundamentos y recomendaciones",» *Electro Industria: Soluciones tecnológicas para la minería, energía e industria*, 2019.
- [10] Coinref, «"Materiales refractarios para hornos industriales profesionales",» Ingeniería Coinref, 2019. [En línea]. Available: <https://www.coinref.com/materiales-refractarios/>. [Último acceso: 08 Abril 2023].
- [11] EcuRed, «"Aislamiento térmico" Fibra ceramica,» EcuRed, 2018. [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Aislamiento_t%C3%A9rmico#Fibra_cer.C3.A1mica. [Último acceso: 09 Abril 2023].
- [12] D. Systems, «"Modernice su proceso de desarrollo de productos",» SolidWorks, 03 Octubre 2022. [En línea]. Available: <https://www.solidworks.com/es/lp/modernize-your-product-development-process>. [Último acceso: 18 Mayo 2023].
- [13] S. Perú, «Industria refractaria | Schemin Perú,» Schemin Perú, 2020. [En línea]. Available: [https://www.scheminperu.com/producto/ladrillo-aislante-k-23/uso-industrial/aislantes-refractarios#:~:text=Usos:,pared%20secundaria\)%20de%20cualquier%20horno](https://www.scheminperu.com/producto/ladrillo-aislante-k-23/uso-industrial/aislantes-refractarios#:~:text=Usos:,pared%20secundaria)%20de%20cualquier%20horno). [Último acceso: 18 Mayo 2023].
- [14] M. Libre, «Metro Alambre Nicromo Kanthal 80/20 Calibre 12,» Mercado Libre , 2023. [En línea]. Available: <https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-753902329-metro-alambre-nicromo-kanthal-8020-calibre-12->. [Último acceso: 12 Mayo 2023].

- [15] CEFIRE, «Mortero refractario | CEFIRE,» Ce-fire.com, 2023. [En línea]. Available: <https://www.ce-fire.com/2014/02/mortero-refractario/#:~:text=El%20mortero%20refractario%20es%20una,a%20altas%20temperaturas%20sin%20fundir.> [Último acceso: 15 Abril 2023].
- [16] AYFISA, «Fibra Ceramica - AYFISA,» Ayfisa.com, 2022. [En línea]. Available: [https://ayfisa.com/fibra-ceramica-4.html?gclid=Cj0KCQjw2v-gBhC1ARIsAOQdKY0rj6XPVgSiYemf0CiOQXCkDs8yF84Uxqoa3tEdBZfmoFqGlr3JdyMaAsN9EALw_wcB.](https://ayfisa.com/fibra-ceramica-4.html?gclid=Cj0KCQjw2v-gBhC1ARIsAOQdKY0rj6XPVgSiYemf0CiOQXCkDs8yF84Uxqoa3tEdBZfmoFqGlr3JdyMaAsN9EALw_wcB) [Último acceso: 16 Abril 2023].
- [17] G. Alfred, «"Tratamientos térmicos en una probeta de acero",» Steemit, 2019. [En línea]. Available: [https://steemit.com/stem-espanol/@gerardoalfred/tratamientos-termicos-en-una-probeta-de-acero.](https://steemit.com/stem-espanol/@gerardoalfred/tratamientos-termicos-en-una-probeta-de-acero) [Último acceso: 16 Mayo 2023].
- [18] A. D. Foxan, «"Temperatura de fusión de un metal",» AirLiquide España - Gases industriales, Mayo 2021. [En línea]. Available: [https://es.airliquide.com/soluciones/soldadura-industrial/temperatura-de-fusion-de-un-metal.](https://es.airliquide.com/soluciones/soldadura-industrial/temperatura-de-fusion-de-un-metal) [Último acceso: 2023 Mayo 17].

Anexos

Anexo I. Especificaciones de los principales materiales de un horno.

Tabla 7. Ladrillo refractario K23.
Fuente: [13]

Ladrillo refractario k23		
Características y especificaciones		Ventajas
Temperatura	1260 °C	Ladrillo súper Refractario, indicado para servicio pesado en bóvedas, muros y pisos de hornos y calderas, cámaras de combustión, zona fría de hornos rotatorios y en general donde además de una alta temperatura de servicio (1763°C) sea importante una buena resistencia al choque térmico y al ataque moderado de escorias y agentes químicos.
Medidas	Altura x 6.35 cm Longitud x 11.4 cm Ancho x 22.8 cm	
Densidad aparente	0.55-0.60 (g/cm3)	
Frío resistencia a la compresión	1.2 MPa	
Módulo de rotura	0.9 MPa	
Recalentar cambio lineal	1230 °C (-0.5)	
Expansión térmica	0.5	
1100 °C (%)		

Tabla 8. Alambre Kanthal A1.
Fuente: [14]

Alambre Kanthal calibre 12		
Diámetro	Calibre 12 AWG / 2.05mm	Utilizado para temperaturas de hasta 1200 °C, esta aleación está compuesta en un 80 % de Níquel y un 20 % de Cromo. El Nicromo 80/20 mantiene su resistencia a la tensión cuando la temperatura se incrementa y respecto a otros materiales posee un alto punto de fusión, no se oxida ni corroe fácilmente, además de no ser magnético y contar con una alta flexibilidad.
Forma	Redonda	
Longitud	1m	
Tratamiento térmico	Recocido	
Temperatura de fusión	1500 °C/2730 °F	
Temperatura máxima de funcionamiento continuo	1200 °C/2190 °F	
Resistencia	0.328 ohms/mt	

Tabla 9. Mortero refractario.
Fuente: [15]

Mortero refractario		
Temperatura	1300 °C a 1600 °C	Estable a altas temperaturas sin fundir. Resistencia a la corrosión y ataque químico. Poca absorción de agua.
Composición química	Alúmina (Al ₂ O ₃) 39% Oxido de Silicio (SiO ₂) 55%	

Tabla 10. Fibra cerámica.
Fuente: [16]

Fibra cerámica		
Conductividad térmica	0.24 [W/m ² K]	La colchoneta de Fibra Cerámica, es un excelente aislante para aplicaciones a muy altas temperaturas, es ligera y flexible, presenta baja conductividad térmica y bajo almacenamiento de calor.
Conductividad térmica a 800 °C	0.19 [W/m ² K]	
Rango de temperatura de servicio	800 °C a 1200 °C	

Anexo II. Tratamientos térmicos en aceros.

Algunos números y letras para crear los códigos de tratamientos térmicos para aluminio:

Tabla 11. Códigos de tratamientos térmicos para aluminio.
Fuente: [Elaboración propia]

Símbolo	Descripción
F	En bruto, el material tal cual sale del proceso de fabricación inicial.
0	Recocido: procedimiento que se aplica a materiales de forja o de fundición que han sufrido un recocido completo.
01	Recocido a elevada temperatura y posterior enfriamiento lento.
02	Sometido a tratamiento termo mecánico.
03	Homogeneizado: alambrones y bandas de colada continua que se someten a tratamiento de difusión a alta temperatura.
W	Solución tratada térmicamente: se aplica en materiales que luego de recibir un tratamiento térmico quedan con estructura inestable.
H	Estado de acritud, deformados. Materiales en los que se llevó a cabo un proceso de endurecimiento a través de deformación.
H1	Endurecimiento por deformación para productos que son deformados para endurecerlos hasta lograr la resistencia deseada sin necesidad de acudir a un tratamiento térmico.
H2	Endurecimiento por deformación y recocido parcial para productos endurecidos por deformación más allá de lo buscado.
H3	Endurecimiento por deformación y estabilización para productos endurecidos por deformación cuyas propiedades mecánicas se estabilizan haciendo uso de un tratamiento térmico que se lleva a cabo a baja temperatura.

Anexo III. Puntos de fusión de los metales

Tabla 12. Puntos de fusión de algunos materiales.
Fuente: [18]

Metales	Punto de fusión	
Estaño	240 °C	450 °F
Plomo	340 °C	650 °F
Zinc	420 °C	187 °F
Aluminio	620-650 °C	1150-1200 °F
Bronce	880-920 °C	1620-1680 °F
Latón	930-980 °C	1700-1800 °F
Plata	960 °C	1760 °F
Cobre	1050 °C	1980 °F
Hierro fundido	1220 °C	2250 °F
Metal monel	1340 °C	2450 °F
Acero de alto carbono	1370 °C	2500 °F
Acero medio para carbono	1430 °C	2600 °F
Acero inoxidable	1430 °C	2600 °F
Níquel	1450 °C	2640 °F
Acero de bajo carbono	1510 °C	2750 °F
Hierro forjado	1593 °C	2900 °F
Tungsteno	3396 °C	6170 °F

Anexo IV. Aceptación del artículo por la INGECO



Estimados(as) autores(as) **M.T.W. David Morales Orozco, ING. Mario González Guzmán, ING. Raúl López López, M.C. Mariano Braulio Sánchez, ING. Rogelio Orozco Martínez** tenemos el agrado de informarles que su trabajo **ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN HORNO ACADÉMICO PARA FUNDICIÓN DE ALUMINIO** fue revisado y **ACEPTADO** por el comité editorial y de arbitraje para ser presentado como ponencia en el INGECO 2023 en modalidad **virtual** y publicado en la Revista Oficial de la Federación Global de Profesionales A.C. (FEGLININ), por lo que es necesario realizar lo siguiente:

1. Llenar y adjuntar la **carta de cesión de derechos** y enviarla a este correo a más tardar el **20 de octubre** misma que se anexa a este correo.
2. Efectuar el pago correspondiente del **29 de agosto al 03 de noviembre** y enviar el comprobante de acuerdo con la Guía de comprobación de pago anexa
3. Revisar la sección PROGRAMA DEL EVENTO a partir del **05 de noviembre** para ver la fecha y hora asignada para la ponencia de su trabajo.
4. Descargar la Plantilla de Presentación en formato PowerPoint disponible en el portal de INGECO: <https://congresoingeco.org.mx>.
5. En caso de no contar con el pago y la documentación completa (artículo aceptado y carta de cesión de derechos) antes del **03 de noviembre** no podrá ser publicado su trabajo.

Atte.

Comité de arbitraje del 3er. Congreso Internacional de Innovación en Ingeniería Industrial, Gestión y Computación en la Era Digital (INGECO)

