



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## DIRECCIÓN DE POSGRADO

### MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

### MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**Título:**

---

MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE FUNDICIÓN PARA  
EL ZINC Y ALUMINIO

---

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de magíster en  
Electromecánica

**Autor:**

Escobar Ruiz Miguel Alejandro

**Tutor**

Moreano Martínez Edwin Homero, MgC.

LATACUNGA – ECUADOR  
2021

## **AVAL DEL TUTOR**

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación Modelación y simulación del proceso de fundición para el zinc y aluminio presentado por Miguel Alejandro Escobar Ruiz, para optar por el título Magíster en Electromecánica.

## **CERTIFICO**

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, 17 de noviembre del 2021



MSc. Edwin Homero Moreano Martínez  
CC.: 050260750-0

## AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: Modelación y simulación del proceso de fundición para el zinc y aluminio, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electromecánica; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

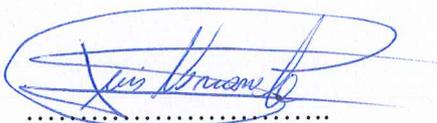
Latacunga, 07 de diciembre del 2021



MSc. Cristian Fabián Gallardo Molina

C.C:050284769-2

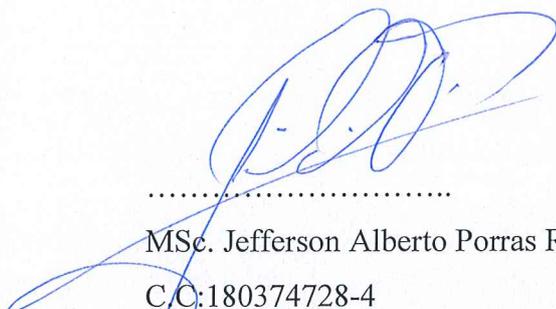
Presidente del tribunal



MSc. Luis Miguel Navarrete López

C.C:180374728-4

Lector 2



MSc. Jefferson Alberto Porras Reyes

C.C:180374728-4

Lector 3

## **DEDICATORIA**

Dedicó este trabajo de tesis a mis padres que me han forjado principios y valores como ser humano, agradecerles por el apoyo de cada uno de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este.

Gracias madre y padre.

*Miguel Alejandro*

## **AGRADECIMIENTO**

Dios, tu amor y tu bondad no tiene fin,  
me permites sonreír ante todos mis  
logros que son resultado de tu ayuda,  
que si caigo y me pones a prueba,  
aprendo de mis errores, padre celestial  
te agradezco por tus bendiciones y ser  
siempre el guía principal en mi vida.

*Miguel Alejandro*

## RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, 08 de diciembre de 2021

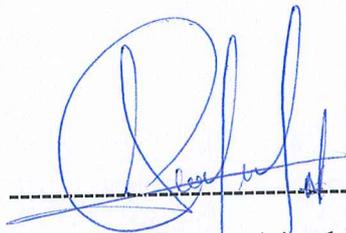


Ing. Miguel Alejandro Escobar Ruiz  
CC.: 050362480-1

## RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, 08 de diciembre de 2021

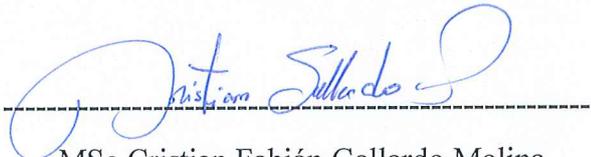
A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized 'M' followed by 'A', 'E', 'S', 'C', 'O', 'B', 'A', 'R', 'R', 'U', 'I', 'Z'. The signature is written over a horizontal dashed line.

Ing. Miguel Alejandro Escobar Ruiz  
CC.: 050362480-1

## **AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: Modelación y simulación del proceso de fundición para el zinc y aluminio contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, 07 de diciembre 2021



MSc. Cristian Fabián Gallardo Molina

C.C:050284769-2

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## DIRECCIÓN DE POSGRADO

### MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

**Título:** Modelación y simulación del proceso de fundición para el zinc y aluminio.

**Autor:** Miguel Alejandro Escobar Ruiz

**Tutor:** Edwin Homero Moreano Martínez, MgC.

### RESUMEN

El presente proyecto de investigación tuvo como propósito desarrollar el modelado y simulación de los procesos de fundición del zinc y aluminio; procesos muy importantes desde la perspectiva de los estudiantes del Instituto Tecnológico Superior Cotopaxi en sus prácticas de laboratorio, hasta la operatividad de las industrias metalúrgicas de la ciudad de Latacunga. Entre las tareas específicas, el trabajo identificó y modeló matemáticamente el comportamiento térmico del proceso de fundición del zinc y aluminio; también, categorizó los procesos de fundición del zinc y aluminio que rigen el dimensionamiento matemático y computacional. Además, se establecieron los procesos de fundición del zinc y aluminio en MATLAB y se evaluó el proceso de fundición en una interfaz GUIDE del programa antes mencionado. La metodología utilizada fue de tipo Extreme Programming (XP) y estuvo caracterizado de cinco dimensiones principales, la recopilación de las características del horno de fundición, la identificación de las variables en sistema lineal, el modelamiento matemático (preprocesado, procesado y postprocesado), la simulación del modelo matemático en MATLAB GUIDE y la verificación de resultados; cada proceso tuvo su algoritmo, iteración y depuración. Entre los resultados obtenidos del simulador de horno de fundición se encuentran que el aluminio se funde a una temperatura promedio de 601,86 °C en un tiempo promedio de 22,55 minutos, mientras que el zinc se funde a una temperatura de 387 °C en un tiempo promedio de 27,14 minutos. Con los datos experimentales se pudo verificar el buen funcionamiento de la simulación, las diferencias que se encontraron en el proceso de precalentamiento es del 10,5% para el aluminio y 9,6% para el zinc, mientras que en el proceso de fundición es de 9,7% para el aluminio y 8,9% para el zinc en la mayoría de los casos, lo que demuestra que el modelo tiene un gran potencial para simular el horno de prueba.

**Palabras clave:** Aluminio, fundición, modelado matemático, temperatura, tiempo, simulación, zinc.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI  
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

**Title:** Modeling and simulation of the smelting process for zinc and aluminum..

**Author:** Miguel Alejandro Escobar Ruiz

**Tutor:** Edwin Homero Moreano Martínez, MgC.

**ABSTRACT**

The purpose of this research project was to develop the modeling and simulation of the zinc and aluminum smelting processes; very important processes from the perspective of the students of the Instituto Tecnológico Superior Cotopaxi in their laboratory practices, to the operation of the metallurgical industries of the city of Latacunga. Among the specific tasks, the work identified and mathematically modeled the thermal behavior of the zinc and aluminum smelting process; also, categorized the zinc and aluminum smelting processes governing the mathematical and computational dimensioning. In addition, the zinc and aluminum smelting processes were established in MATLAB and the smelting process was evaluated in a GUIDE interface of the aforementioned program. The methodology used was Extreme Programming (XP) and was characterized by five main dimensions, the collection of the smelting furnace characteristics, the identification of the variables in linear system, the mathematical modeling (preprocessing, processing and post-processing), the simulation of the mathematical model in MATLAB GUIDE and the verification of results; each process had its algorithm, iteration and debugging. Among the results obtained from the melting furnace simulator are that aluminum melts at an average temperature of 601.86 °C in an average time of 22.55 minutes, while zinc melts at a temperature of 387 °C in an average time of 27.14 minutes. With the experimental data it was possible to verify the good performance of the simulation, the differences found in the preheating process is 10.5% for aluminum and 9.6% for zinc, while in the melting process is 9.7% for aluminum and 8.9% for zinc in most cases, which shows that the model has a great potential to simulate the test furnace.

**Keywords:** Aluminum, smelting, mathematical modeling, temperature, time, simulation, zinc.

Yo, Mg Marco Paúl Beltrán Semblantes con cédula de identidad número 0502666514 Licenciado en Ciencias de la Educación especialización Inglés con número de registro de la SENESCYT: 1020-06-701921; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: "Modelación y simulación del proceso de fundición para el zinc y aluminio." de: Miguel Alejandro Escobar Ruiz aspirante a Magíster en Electromecánica.



Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes  
0502666514



CENTRO  
DE IDIOMAS

Latacunga, diciembre, 09, 2021

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEORICA	11
1.1. Introducción	11
1.2. Antecedentes de la investigación	11
1.3. Fundamentación teórica	14
1.3.1 Proceso de fundición del zinc y aluminio	14
1.3.2 Características técnicas del zinc y aluminio	17
1.3.3 Horno de fundición	20
1.3.4 Parámetros de fundición	23
1.3.5 Modelos Matemáticos	24
1.3.6 Simuladores	25
1.4. Conclusiones Capítulo I	32
CAPÍTULO II. PROPUESTA	33
2.1. Introducción y objetivo	33
2.2. Metodología de cálculo	33
2.3. Modelamiento matemático	35
2.3.1. Modelo no lineal	36
2.3.3. Análisis de transferencia de calor por radiación	38
2.3.4. Modelo no lineal en espacio de estados	42
2.3.5. Cálculo de los puntos de equilibrio	43
2.3.6. Linealización entorno a los puntos de equilibrio	44
2.3.7. Resistencia eléctrica	47
2.4. Código de Matlab	49
2.5. Conclusiones Capítulo II	49
CAPÍTULO III. VALIDACION DE LA PROPUESTA	50
3.1. Análisis de los resultados	50
3.2. Validación técnica-económica de los resultados	59

3.3. Evaluación de expertos _____	65
3.4. Evaluación de usuarios _____	76
3.5. Evaluación de resultados _____	80
3.6. Conclusiones Capítulo III _____	96
CONCLUSIONES GENERALES _____	97
RECOMENDACIONES _____	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	100
ANEXOS _____	105

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables _____	6
Tabla 2. Actividades o tareas de los objetivos específicos _____	7
Tabla 3. Principales características físicas del aluminio _____	17
Tabla 4. Principales propiedades mecánicas del aluminio puro _____	18
Tabla 5. Principales características físicas del zinc _____	18
Tabla 6. Principales propiedades mecánicas del zinc puro _____	19
Tabla 7. Cuadro comparativo entre sistemas de cálculo numérico _____	25
Tabla 8. Ecuación para el cálculo numérico _____	34
Tabla 9. Cuadro comparativo entre sistemas de cálculo numérico _____	35
Tabla 10. Propiedades físicas del horno de fundición _____	42
Tabla 11. Temperatura y tiempo fundición del aluminio (arranque en frío) ____	50
Tabla 12. Temperatura y tiempo fundición del aluminio (arranque en caliente)	52
Tabla 13. Temperatura y tiempo fundición del zinc (arranque en frío) _____	54
Tabla 14. Temperatura y tiempo fundición del zinc (arranque en caliente) ____	56
Tabla 15. Datos cantidad de aluminio en el proceso de fundición _____	58
Tabla 16. Datos cantidad de zinc en el proceso de fundición _____	58
Tabla 17. Recurso Humano _____	60
Tabla 18. Caracterización del Hardware para el desarrollo _____	60
Tabla 19. Hardware adicional para el desarrollo _____	61
Tabla 20. Costo total del hardware para el desarrollo _____	61
Tabla 21. Caracterización del Hardware para la implantación _____	61
Tabla 22. Hardware adicional para la implantación _____	62
Tabla 23. Costo total del hardware para la implantación _____	62
Tabla 24. Caracterización del Software para el desarrollo _____	62

Tabla 25. Caracterización del Software para la implantación_____	63
Tabla 26. Capacitación del Recurso Humano_____	63
Tabla 27. Costo del diseño del simulador_____	64
Tabla 28. Costo total del diseño del simulador_____	64
Tabla 29. Formato de validación del simulador de horno_____	65
Tabla 30. Validación uno del simulador horno de fundición_____	67
Tabla 31. Validación dos del simulador horno de fundición_____	69
Tabla 32. Validación tres del simulador horno de fundición_____	71
Tabla 33. Validación cuatro del simulador horno de fundición_____	73
Tabla 34. Validación cinco del simulador horno de fundición_____	74
Tabla 35. Evaluación de los usuarios-docentes_____	77
Tabla 36. Resultados de la evaluación de los usuarios-docentes_____	78
Tabla 37. Evaluación de los usuarios-estudiantes_____	79
Tabla 38. Resultados de la evaluación de los usuarios-estudiantes_____	80
Tabla 39. Instrumentos e insumos para la fundición en tiempo real_____	81
Tabla 40. Objetos metálicos de aluminio con su peso_____	82
Tabla 41. Proceso de fundición del aluminio en tiempo real_____	83
Tabla 42. Objetos metálicos de zinc con su peso_____	86
Tabla 43. Proceso de fundición del zinc en tiempo real_____	87
Tabla 44. Escoria de aluminio y zinc con su peso_____	89
Tabla 45. Proceso de fundición del aluminio con el simulador_____	90
Tabla 46. Proceso de fundición del zinc con el simulador_____	93

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de fundición del zinc _____	14
Figura 2. Proceso de fundición del aluminio _____	16
Figura 3. Diagrama de un horno de resistencia eléctrica _____	21
Figura 4. Interfaz de MATLAB _____	26
Figura 5. Interfaz de SIMULINK _____	27
Figura 6. Interfaz de LABVIEW _____	28
Figura 7. Interfaz de SCILAB _____	29
Figura 8. Interfaz de GNU Octave _____	30
Figura 9. Interfaz de MAPLE _____	31
Figura 10. Metodología _____	34
Figura 11. Temperatura vs tiempo fundición Al (arranque frío) _____	51
Figura 12. Temperatura promedio vs tiempo fundición Al (arranque frío) _____	51
Figura 13. Temperatura vs tiempo fundición Al (arranque caliente) _____	53
Figura 14. Temperatura promedio vs tiempo fundición Al (arranque caliente) _____	53
Figura 15. Temperatura vs tiempo fundición Zn (arranque frío) _____	55
Figura 16. Temperatura promedio vs tiempo fundición Zn (arranque frío) _____	55
Figura 17. Temperatura vs tiempo fundición Zn (arranque caliente) _____	57
Figura 18. Temperatura promedio vs tiempo fundición Zn (arranque caliente) _____	57
Figura 19. Cantidad de aluminio empleado en la fundición _____	58
Figura 20. Cantidad de zinc empleado en la fundición _____	59

## INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo de Titulación está situado en la **línea de investigación** relativa a los Procesos Industriales, y la **sublínea** Diseño, construcción y mantenimiento de elementos, prototipos y sistemas Electromecánicos, específicamente se relacionan con la modelación y simulación del proceso de fundición para el zinc y aluminio porque al ser la fundición de metales una actividad consolidada en los procesos industriales de los cotopaxenses enfoca mejores prácticas ingenieriles en el diseño, construcción y mantenimiento de sistemas electromecánicos adheridos a la fundición de estos metales.

La pertenencia de la investigación con los procesos de fundición de metales, está constituida por el conocimiento que genera una modelación y simulación del proceso de fundición del zinc y aluminio, tanto en el fondo de sus bases matemáticas, como en la forma electromecánica que tienen que cumplir los hornos industriales para satisfacer categorías de eficiencia energética, seguridad y procesos industriales eficaces; aspectos consecuentes al plan de desarrollo de la matriz productiva de la ciudad y la provincia, que generan oportunidades competitivas en la manufactura de metales nobles como lo son zinc y el aluminio.

En la industria metalúrgica donde se efectúan procesos de fundición de materiales para la manufactura de productos terminados por ejemplo con el aluminio: utensilios de cocina, ollas, sartenes, etc.; o en el caso del zinc para acumuladores, baterías, componentes electrónicos, etc., se cuenta con hornos para tratamientos térmicos cuya operación no es eficiente debido a un monitoreo inexacto de la temperatura del horno. Dadas las características y especificidad de los tratamientos térmicos que necesita la estructura molecular de los materiales, es necesario obtener un modelado eficaz de la termodinámica del horno, instrumentarlo adecuadamente y diseñar una estrategia de control avanzado que derive de una simulación que pueda establecer resultados cuasi reales con valores tolerables a la operatividad del horno de fundición de materiales. En este sentido, en los siguientes apartados del epígrafe se diverge sobre el planteamiento del problema y su formulación.

En el mundo la industria mecánica y electromecánica se fundamenta en la capacidad para mejorar o diseñar equipos que se basen en las limitaciones del mismo y los rangos efectivos de trabajo; en este sentido, para lograr determinar estas características es relevante someter cada equipo a una serie de pruebas físicas o químicas que aseguren los estándares de calidad y funcionamiento exitoso; para este tipo de evaluación intervienen los modelos matemáticos y las simulaciones que permiten planificar y analizar de manera detallada y anticipada, el comportamiento del equipo en resultados favorables y desfavorables evitando las limitaciones físicas o económicas.

Siendo, la fundición de metales una de las actividades más difundidas a nivel mundial, en escalas artesanales o de tipo industrial, debido al uso extendido de productos metalúrgicos para la construcción de máquinas e infraestructuras, joyería, reciclaje de materiales procesados, así como para la creación de piezas mecanizadas u ornamentales [1]. De forma global, los procesos industriales buscan el uso de técnicas que permitan disminuir costos para obtener la mayor ganancia posible, empleando combustibles fósiles y vegetales como fuente de energía, despreocupados de los efectos secundarios hacia el ecosistema [2].

La Constitución de la República del Ecuador en el Art.75 asegura que serán funciones principales de las universidades y escuelas politécnicas, la investigación científica, la formación profesional y técnica, la creación y desarrollo de la cultura nacional y su difusión en los sectores populares, así como el estudio y el planteamiento de soluciones para los problemas del país, a fin de contribuir a crear una nueva y más justa sociedad ecuatoriana, con métodos y orientaciones específicos para el cumplimiento de estos fines [3].

En este sentido de la investigación científica y el desarrollo de la educación superior para la ciencia, la Universidad Técnica de Cotopaxi crea el programa de Maestría en Electromecánica con Registro N° RPC-SO-17-N° 278-2019-CES con el propósito de formar profesionales con interés investigativo y científico para solucionar los problemas de la provincia o el país, a través del conocimiento y la técnica. A su vez, el Ministerio Coordinador de la Producción, Empleo y Competitividad, propone en su Estudio técnico para la identificación de una política

comercial para el sector metalmeccánico del Ecuador [4], un modelo para la planificación y gestión de proyectos prioritarios para el sector metalmeccánico y metalúrgico cuyo objetivo principal es el desarrollo de productos competitivos para que accedan a mercados nacionales e internacionales. De esta manera la Universidad Técnica de Cotopaxi pretende solventar un proceso tan importante para la industria metalúrgica y metalmeccánica como es la fundición del aluminio y zinc, a través de una simulación y un modelado matemático.

En el Ecuador, las industrias dedicadas a la metalurgia tienen dos frentes de trabajo, la extracción de minerales para exportación y el reciclado de metales en productos de uso local, siendo el segundo la actividad que requiere aplicar la fundición de metales, ya sea a escala industrial, como las plantas de acero y aluminio que utilizan calderos u hornos de resistencia eléctrica para alcanzar la temperatura necesaria para el procesamiento; o a nivel artesanal en metalmeccánicas locales que realizan esta actividad para satisfacer la demanda de mecánicos que utilizan materiales como el aluminio, el acero o el bronce para trabajos específicos [5].

La industria metalúrgica en Ecuador no realiza un proceso de fundición de metales de forma tecnificada por medio del modelamiento matemático y simulación en programas computacionales, simplemente le han convertido en un proceso especulativo y mecánico que tiene que ser cumplido a determinado tiempo y con determinada temperatura; el país no tiene la previsión de monitorear y controlar las implicaciones que causa la fundición de materiales sin la debida fiscalización del desperdicio de materiales, el uso de combustibles contaminantes, el desperdicio de energía, la contaminación ambiental y el riesgo de trabajar con productos metálicos con alto grado de impurezas para el ensamblado de maquinarias o estructuras, además para la piezas de mecanizado que muchas de las veces son utilizadas en actividades de delicada precisión, como son la explotación del petróleo o la generación de energía hidroeléctrica. Las industrias ecuatorianas desmeritan el modelado matemático y una simulación de los procesos de fundición de los metales provocando inseguridad en los productos que deriven de la fundición de dichos materiales.

En Cotopaxi, la fundición de metales en pequeñas industrias se realiza a baja escala, de manera artesanal empleando hornos de crisol adaptados para quemar combustibles fósiles, principalmente GLP (Gas Licuado de Petróleo), o una mezcla del mismo con oxígeno industrial, obteniendo una mejor combustión [6]. Este mismo proceso es utilizado en el Instituto Superior Tecnológico “Cotopaxi” de la ciudad de Latacunga para la demostración práctica de los procesos de fundición y modelado de bronce o aluminio destinado a los estudiantes y supervisado por el docente, desde luego encasillado en las normas y equipamiento de seguridad.

Por otra parte, tanto las industrias fundidoras de la ciudad de Latacunga, como en el instituto; lo relevante de este proceso, no tiene significancia en el método empleado para fundir el metal, sino el resultado; en consecuencia, el resultado en ambos casos es el realizar el vaciado en moldes, tanto para la construcción de piezas como para estudiar el comportamiento de la termodinámica del proceso. Estas características han inducido que el método de fundición carezca de un modelado matemático y una simulación para validación de resultados, que permitan calidad en los materiales y buenas prácticas de metalurgia.

La fundición de metales en la ciudad de Latacunga, no es tecnificada, actualmente no se dispone de un software que permita la modelación y simulación de fundición de los diferentes tipos de metales, siendo de suma importancia desarrollar un prototipo tecnológico que permita realizar el análisis detallado del proceso de fundición tanto para su estudio como para estimar la calidad de las piezas procedentes de los metales fundidos. El efecto que produce la carencia de este software, puede presentar datos erróneos de los cuales no se tengan en consideración variables termodinámicas presentes y relevantes para el proceso de fundición; desencadenando metales burbujeantes o cristalizados; o se puede distorsionar la fundición tanto en el tiempo o la temperatura, los cuales permiten una simulación correcta en similitud hacia la realidad.

En la industria metalúrgica cotopaxense no se ha observado la existencia de un software de modelado y simulación de los procesos de fundición de los materiales zinc y aluminio, común en esta localidad en vías de desarrollo en la industria metalmeccánica. Esta institución de educación superior presenta varios

inconvenientes que afectan el material metálico resultante, causando falencias en piezas metálicas moldeadas y estudio inproporcional a la termodinámica de la fundición en las prácticas de laboratorio del instituto sin obtener la calidad deseada. A pesar del grado de enseñanza y equipamiento del establecimiento, es una institución que no cumple con las condiciones óptimas de modelamiento y simulación de los procesos de fundición de los materiales en su horno de trabajo.

Todos estos problemas inciden en la fundición de materiales con procesos escasamente tecnificados y modelados matemáticamente, causando la pérdida de recursos, tiempo, desgaste del horno, cristalización de los materiales, moldes metálicos de mala calidad y un deficiente monitoreo y control en las prácticas de laboratorio de la fundición de materiales; a sabiendas que la educación integral está regida por la práctica para una óptima profesionalización del conocimiento. Para la determinación del problema principal, se realizó reuniones y consultas entre el directivo de la institución, aquí se analizaron varios tipos de dificultades que surgieron de malas ejecuciones de los procesos de fundición de los materiales zinc y aluminio, llegando a la conclusión de que el mayor problema del centro de estudios es inexistencia de un software para modelado y simulación de este proceso tan necesario para la mecánica, electromecánica y todas las ingenierías que emplean los derivados metalúrgicos para la industrialización de productos.

El desenvolvimiento de la investigación, desde la problemática descrita en líneas anteriores, devela el siguiente **problema científico**: ¿Cuáles son los parámetros que permitirán el modelado y simulación en un programa de computadora para los procesos de fundición de los materiales zinc y aluminio? En concordancia a esta concepción problemática, se deriva, el **objeto de la investigación** que apuntala al proceso de fundición del zinc y el aluminio, en conexión al **campo de acción** definido por la modelación y simulación destinados a los metales nobles más utilizados en la industria cotopaxense. En congruencia, la variable dependiente está constituida por la fundición del zinc y aluminio, mientras que la variable independiente es la modelación y simulación; la tabla 1 muestra la operacionalización de estas variables.

**Tabla 1. Operacionalización de variables**

<b>Variable Dependiente: FUNDICIÓN DEL ZINC Y ALUMINIO</b>		
<b>Definición</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>
Es el proceso con el cual los metales como el zinc y el aluminio pasan del estado sólido al estado líquido, a través de la elevación de la temperatura en forma constante.	Temperatura	Forma geométrica Resistencia Calor
	Tiempo	Minutos
<b>Variable Independiente: MODELACIÓN Y SIMULACIÓN</b>		
Es un proceso de representación numérica y matemática que se hace sobre un fenómeno físico, para representarlo por medio de un algoritmo en una programa de computador	Métodos numéricos	Ecuaciones
	Algoritmos	Diagramas de flujo

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

De este modo, surge el interés de conocer sobre la importancia que tiene la modelación y simulación de la fundición de estos dos metales, recursos profesionales mínimamente explotados por la industria metalúrgica para prevenir errores en sus procesos técnicos como la fundición; en consecuencia, se genera interés por investigarlos y sobre todo para crear una cultura de mejora continua y buenas prácticas industriales, mediante el uso de instrumentos informáticos que permiten pronosticar de manera simulada los resultados de un proceso. Es por ello que el **objetivo general** de la investigación es: Desarrollar el modelado y simulación de los procesos de fundición del zinc y aluminio.

**Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos**, definidos los objetivos se elabora las actividades y tareas que se estructuran según lo puntualiza la tabla 2, en ella se implanta un compendio de acciones estratégicas que hacen posible abordar la modelación y simulación del proceso de fundición de los materiales zinc y aluminio para poder establecer parámetros técnicos muy importantes para la industria metalúrgica, dedicada al uso de estos metales para la elaboración de productos de base; además, con los obtenidos se puede documentar de forma técnica las condiciones termo físicas que requiere un horno de fundición para operar con estos dos elementos.

**Tabla 2. Actividades o tareas de los objetivos específicos**

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDAD	RESULTADO DE LA ACTIVIDAD	MÉTODOS-TÉCNICAS
<p><b>Objetivo 1:</b></p> <p>Identificar y modelar matemáticamente el comportamiento térmico del proceso de fundición del zinc y aluminio.</p>	<p>a.- Levantamiento de información del equipo y personal encargado del proceso de fundición.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagnosticar la situación actual del proceso de fundición de los materiales.</li> </ul>	<p>Investigación bibliográfica: Ficha nemotécnica</p>
	<p>b.- Identificación de las propiedades del zinc y aluminio.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conocer las características del zinc y aluminio.</li> </ul>	<p>Investigación de campo: Diagrama de contenido.</p>
	<p>c.- Modelamiento matemático del zinc y aluminio</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelar matemáticamente el proceso de fundición del zinc y aluminio.</li> </ul>	<p>Investigación bibliográfica: Ecuaciones</p>
<p><b>Objetivo 2:</b></p> <p>Categorizar los procesos de fundición del zinc y aluminio que rige el dimensionamiento matemático y computacional.</p>	<p>a.- Elaboración de flujogramas del proceso de fundición del zinc y aluminio.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estandarizar el proceso de fundición.</li> </ul>	<p>Investigación de campo: Flujogramas.</p>
	<p>b.- Toma de tiempos y variables termodinámicas del proceso de fundición.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conocer los tiempos y variables termodinámicas del proceso de fundición de los materiales.</li> </ul>	<p>Inductivo-Deductivo: Matriz de tiempos y variables termodinámicas. Cronómetro, Pirómetro.</p>

	c.- Análisis de resultados encontrados en el proceso de fundición.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar los hallazgos en la línea de fundición de materiales</li> </ul>	Observación de procesos internos: Curvas temperatura vs tiempo
<b>Objetivo 3:</b>  Establecer los procesos de fundición del zinc y aluminio en una herramienta informática de alto desempeño en el modelamiento matemático.	a.- Simulación de los procesos de fundición del zinc y aluminio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Experimentar en un software el modelamiento matemático de la fundición del zinc y aluminio.</li> </ul>	Observación, Deductivo: Tutoriales-Manuales de MATLAB.
	b.- Elaboración de hojas de validación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control adecuado de las actividades involucradas en el proceso de fundición.</li> </ul>	Observación, Inductivo: Matriz de validación de pruebas de resultados.
<b>Objetivo 4:</b>  Evaluar la simulación de los procesos de fundición del zinc y aluminio	a.- Establecer una bitácora de pruebas del simulador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar el desempeño del simulador.</li> </ul>	Investigación de campo: Socialización con el personal involucrado en la fundición de materiales.
	b.- Practicar en la simulación de los procesos de fundición zinc y aluminio.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crear una matriz de procesos de fundición simulados y no simulados.</li> </ul>	Investigación de campo: Interpretación de resultados, conclusiones

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

**Justificación,** el progreso tecnológico en la industria y los procesos electromecánicos se enfoca en la inmediata comunicación que existe para la obtención de información y datos de campo en tiempo real desde un software de computadora; además de la simulación de procesos que ahorran recursos y previenen el desperdicio de materiales. La actualización tecnológica de los equipos electromecánicos para las diferentes áreas de la industria, están diseñados y construidos por el desarrollo de nuevos modelos matemáticos, que predicen las respuestas de los sistemas con mejor precisión y mayor eficacia de operación.

En el proceso de la obtención de la descripción matemática del comportamiento térmico en la fundición de los materiales, se requiere un software con interfaces gráficas que permitan visualizar la respuesta de un horno a parámetros reales de la estructura atómica de los materiales utilizando un modelado matemático que se asemeje más al comportamiento requerido del sistema. Para ello, se proveen ajustes al modelo o las variables del mismo de acuerdo a las características del material que entra en proceso de fundición. En este sentido, el proyecto de investigación, busca analizar la capacidad y desempeño del software a ser utilizado basado en la precisión y rapidez de la simulación de procesos mecánicos, electromecánicos e industriales como MATLAB.

En base a este fundamento, la realización de diferentes estudios en un horno de fundición y el comportamiento de los materiales es necesaria para ejecutar procesos de planificación y operación, que permiten definir lineamientos de operación segura en la fundición de los materiales, los cuales son útiles al operador del horno en el Instituto Superior Tecnológico “Cotopaxi” para tomar las mejores decisiones operativas en tiempo real. Por lo tanto, es primordial para la institución y para la educación superior, desarrollar los conocimientos y las competencias necesarias en el uso y modelamiento de los procesos de fundición en MATLAB. Desde esta perspectiva, el presente trabajo permitirá estructurar las bases conceptuales necesarias en el uso y configuración del software que posteriormente servirán para estructurar modelos de fundición de materiales que sean necesarios para las prácticas de laboratorio en la institución o generar empresa en los receptores del conocimiento.

**Hipótesis**, se establece en ¿El modelado y simulación del proceso de fundición del zinc y aluminio, mejorará las prácticas de laboratorio de la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica del Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi?

El proyecto de investigación integra tres capítulos:

En el primer capítulo se aborda la fundamentación teórica y metodológica: El modelado y simulación de los procesos de fundición del zinc y aluminio requiere de una argumentación científica, principalmente matemática para consolidar información técnica y científica con respecto a la termodinámica del proceso de fundición de estos dos metales muy necesario para la toma de decisiones con respecto al horno que se utilice y a la automatización de sistemas industriales en la industria metalúrgica.

En el capítulo dos se describe la propuesta a través de un análisis práctico empezando desde el modelado matemático con los respectivos cálculos matemáticos que representan las ecuaciones que se programarán y configurarán en el programa MATLAB para poder solucionar la problemática existente con respecto a una fundición más eficiente del aluminio y el zinc, sin el desperdicio de energía, la pérdida de materia prima o la mala calidad del producto fundido, para con ello mejorar el proceso térmico y su automatización en la fundición, para la industria metalúrgica.

En el capítulo tres se establece la validación de la propuesta donde se realiza una serie de pruebas y evaluaciones del simulador para comparar sus resultados con respecto a la fundición efectiva y precisa del aluminio y el zinc, en este capítulo se establecerá una bitácora de ensayos estableciendo el comportamiento del simulador frente a varios parámetros digitados en la interfaz del software, como por ejemplo: volumen del metal, tiempo, difusividad térmica, temperatura, topología del horno, entre otras cosas. Además, de la validación de la propuesta se realizará un estudio económico para valorar el impacto que tendrá la propuesta a mediano y largo plazo, el ahorro de recursos y la recuperación del capital de inversión en un escenario de emprendimiento y desarrollo empresarial.

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEORICA

### 1.1. Introducción

En el proceso de fundición basado específicamente para el zinc y aluminio se establece en un proceso en el cual mediante el precalentamiento en el horno se eleva la temperatura, se ingresa el material hacer fundido, mediante un determinado tiempo estos materiales llegan a comportarse de una manera de estado sólido a líquido para lo cual en el desarrollo del capítulo se establece parámetros de investigación que comprenden para la determinación con el objetivo de comprender el funcionamiento del proceso de fundición de los metales (zinc - aluminio) y su modelo matemático es necesario aclarar conceptos básicos teóricos sobre el objeto y el campo de estudio que cubre el proyecto de investigación; para el caso el objeto de investigación es el **proceso de fundición** y el **campo** de estudio es la **simulación y modelamiento matemático** respectivamente. En este epígrafe se detalla sobre los modelos matemáticos, la fundición de metales, y los diferentes softwares de procesamiento matemático y simulación con sus respectivas limitaciones y potencialidades.

### 1.2. Antecedentes de la investigación

En la literatura consulta se encontró escasa información sobre modelado y simulación del proceso de función del aluminio y zinc. Entre los principales trabajos se destacan:

La investigación realizada por Posadas (2012) con el tema “Optimización de un sistema de alimentación para la producción de cabezas de aluminio por el proceso de gravedad”, cuyo propósito tiene énfasis en definir un sistema de colada optimizado para el proceso de gravedad de piezas vaciadas de aluminio mediante procesos de simulación, definiendo las variables que afectan la formación de defectos y sus soluciones. Para ello la metodología utilizada fue de tipo cuantitativa porque partiendo de una colada estándar paramétrica y simulaciones computarizadas se definió y optimizó la colada, mediante el uso del programa de diseño Unigraphics se modificaron las dimensiones de cada uno de los componentes

de la colada en componentes como la copa de vaciado, bastón, choke de bastón, difusor, corredor, entradas y jaulas, iniciando la evaluación de la canastilla de vaciado, variando la altura, forma y ancho, emulando la transformación en líquido para examinar de la colada durante el llenado, y con esos resultados generar una hoja de datos que muestren los efectos y fundición de los metales tratados. Entre los resultados se destaca que se logró obtener piezas sanas libres defectos con un sistema de alimentación optimizado por medio del análisis de llenado de la colada y registrando el efecto que tenía el cambio de una variable en el diseño de cada componente de una colada paramétrica [7].

El trabajo de investigación desarrollado por Vallejo (2013) con el tema “Simulación de fundición por ordenador mediante QuikCAST” cuyo propósito fue crear un guion para aprender el manejo y usos del programa QuikCAST, para ello se ha creado una pieza en 3D, esta con el programa Solid Works. La metodología utilizada fue de tipo cuantitativa junto con una tipología de investigación de campo y la investigación experimental porque se trabajó con valores matemáticos y estadísticos para determinar el proceso físico térmico de la fundición del aluminio. El programa QuikCAST es una herramienta robusta que permite por medio de modelos STL en 3D simular el comportamiento del proceso metalúrgico, así como establecer los parámetros de tiempo y temperatura por medio de una interfaz otorgando interactividad a la simulación y brindando la oportunidad de generar diferentes eventos y condiciones del objeto de fundición. Entre los principales resultados se obtuvo que hay mayor eficiencia al trabajar con el aluminio AlSi7Mg a una temperatura de 610°C con una velocidad de llenado del molde de 0,007 Kg/s, esto ha facilitado determinar una óptima temperatura y una velocidad adecuada de llenado de la pieza o molde receptor de la colada de aluminio [8].

En la investigación realizada por Cangás & Valverde (2014) con el tema “Estudio del proceso de solidificación en fundición de aluminio para brazos del sistema de freno de un ascensor, mediante elementos finitos”, el trabajo contiene un estudio del proceso de fundición de aluminio para brazos del sistema de freno de un ascensor eléctrico mediante elementos finitos utilizando el software Click2Cast. A su vez contiene el análisis de esfuerzos mecánicos a los que se encuentra sometido

el brazo del sistema de freno de un ascensor, utilizando también el software Autodesk Simulation Multiphysics 2013, de esta manera se efectúa el análisis de las reacciones físicas que se producen al momento de detener el ascensor, las cuales conforman los contrapesos nodales y condiciones de frontera aplicadas en el software citado. Los resultados demuestran que la utilización de un software para la simulación del proceso de fundición permite realizar modificaciones a diferentes condiciones que rigen la etapa de llenado, alcanzando un análisis con la suficiente aproximación, con lo cual se obtiene una optimización de recursos, disminuyendo tiempo de diseño y costos de producción [9].

En la investigación desarrollada por Escudero (2016) con el tema “Modelado matemático para la obtención de coeficientes de transferencia de calor en aleaciones de aluminio hipoeutécticas”, con el propósito de desarrollar un modelo que permita determinar el coeficiente de transferencia de calor en función a la variación de la composición química de aleaciones de aluminio hipoeutécticas, además generar una base de datos que sirvan para determinar las consecuencias derivadas del cambio de estado en la estructura química del elemento y sus aleaciones, así como los coeficientes de transferencia calórica en las operaciones de fundición aplicados para la fabricación de monoblocks de aluminio. La metodología fue de tipo cuantitativa, porque se enfocó en el análisis e la base de datos y de las piezas enviadas al laboratorio externo muestran que hay excelente correlación en la información que arroja el software JMatPro, esto debido a que los cálculos de las propiedades termo físicas son calculados por el comportamiento termodinámico y de las fases de los elementos de aleación a diferentes temperaturas [10].

En el estudio efectuado por Silva (2018) que tiene por título “Análisis de la metodología de fundición del (Al) por gravedad destinado a la producción de herrajes y planificación metalúrgica óptima en Metallan S.A.S”, cuyo propósito tiene énfasis en diseñar y proponer un plan de mejoramiento para el proceso de FAGC para la fabricación de herrajes eléctricos en Metallan S.A.S. La metodología utilizada es de tipo cuantitativa porque realiza un proceso de diseño de un nuevo proceso de FAGC involucrando una mejora moderada de tecnología, procesos, procedimientos, control de calidad y distribución de planta del proceso del FAGC.

Los resultados demuestran que al aplicar las propuestas de mejora se puede evidenciar que la productividad tiende a incrementar considerablemente desde la fase uno del proceso, la capacidad instalada, la capacidad efectiva y la productividad tiende a incrementar en un 52% en la fase dos del proceso. Además, se proyecta que la calidad de los productos incremente en al menos un 3,3% [11].

### 1.3. Fundamentación teórica

#### 1.3.1 Proceso de fundición del zinc y aluminio

##### Proceso de fundición del zinc:

El zinc se encuentra en la corteza terrestre principalmente como sulfuro de zinc (ZnS). Las aplicaciones relevantes de este metal, encierran el cromado galvánico de muchas variantes del acero, especialmente del latón, destinados a ser conductores para líneas eléctricas, pinturas y también la vulcanización del caucho. La mayoría de estas aplicaciones dependen en gran medida de la resistencia del zinc a la corrosión y sus características de peso ligero [12]. La figura 1 muestra el proceso de fundición del zinc.

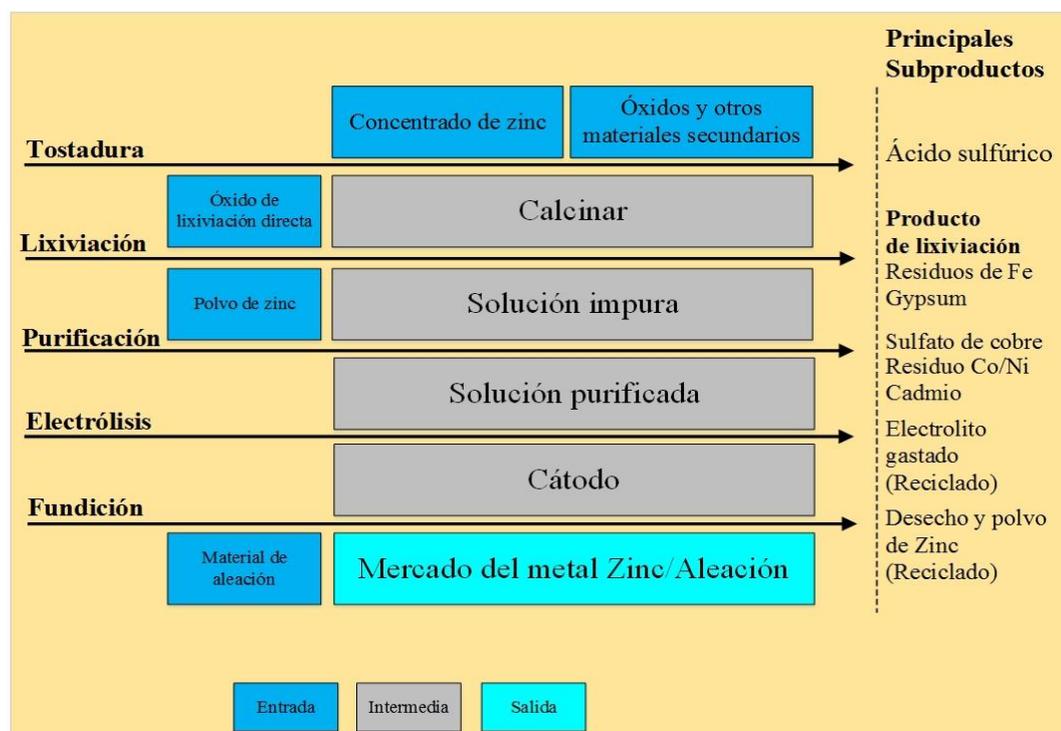


Figura 1. Proceso de fundición del zinc. Elaborado por: Investigador basado en [13].

Los minerales de zinc normalmente pueden contener de 3 a 11 por ciento de zinc, junto con cadmio, cobre, plomo, plata y hierro. El beneficio, o la concentración del zinc en el mineral recuperado, se logran en la mina o cerca de ella mediante un proceso de trituración, molienda y flotación. Una vez concentrado, el mineral de zinc se transfiere a las fundiciones para la producción de zinc u óxido de zinc. El producto principal de la mayoría de las empresas de zinc es el zinc en bloques, que se produce en 5 grados: especial de alto grado, alto grado, intermedio, latón especial y prime western [13].

El zinc se puede producir pirometalúrgicamente o hidrometalúrgicamente, dependiendo del tipo de mineral utilizado como carga. En el proceso pirometalúrgico, el concentrado de mineral que contiene zinc se alimenta, en algunos casos después de la sinterización, a una fundición primaria. La concentración de zinc está en el rango de 40 a 60%, con contenido de azufre en minerales sulfídicos en el rango de 26 a 34%. Durante la sinterización, se utiliza una ráfaga de aire caliente u oxígeno para oxidar el azufre presente en la alimentación a dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Los procesos modernos de fundición directa incluyen QSL, Kivcet, AUSMELT y TBRC [14].

### **Proceso de fundición del aluminio:**

La producción de aluminio comienza con la extracción y el beneficio de la bauxita. En la mina, el mineral de bauxita se traslada a una trituradora. Luego, el mineral triturado se tamiza y se almacena, listo para su entrega a una planta de alúmina. En algunos casos, el mineral se mejora su beneficio mediante (lavado, clasificación por tamaños y separación de líquidos y sólidos) para eliminar materiales no deseados como arcilla y silicio. En la planta de alúmina, el mineral de bauxita se tritura o muele aún más hasta el tamaño de partícula correcto para una extracción eficiente de la alúmina a través de la digestión con un licor de hidróxido de sodio caliente [15].

Después de eliminar el “barro rojo” (la parte insoluble de la bauxita) y los sólidos finos del licor del proceso, los cristales de trihidrato de aluminio se precipitan y se calcinan en hornos rotatorios o calcinadores de lecho fluidizado para producir

alúmina ( $Al_2O_3$ ). El aluminio primario se produce por reducción electrolítica de la alúmina. La alúmina se disuelve en un baño fundido de compuestos de fluoruro (el electrolito) y se pasa una corriente eléctrica a través del baño, lo que hace que la alúmina se disocie para formar aluminio y oxígeno líquidos. El oxígeno reacciona con el carbono del electrodo para producir dióxido de carbono y monóxido de carbono [16]. El aluminio fundido se acumula en el fondo de las celdas o recipientes individuales y se retira al vacío en crisoles de rosca. Hay dos tecnologías destacadas para la fundición de aluminio: precocido y Soderberg. La figura 2 muestra el proceso de fundición del aluminio.

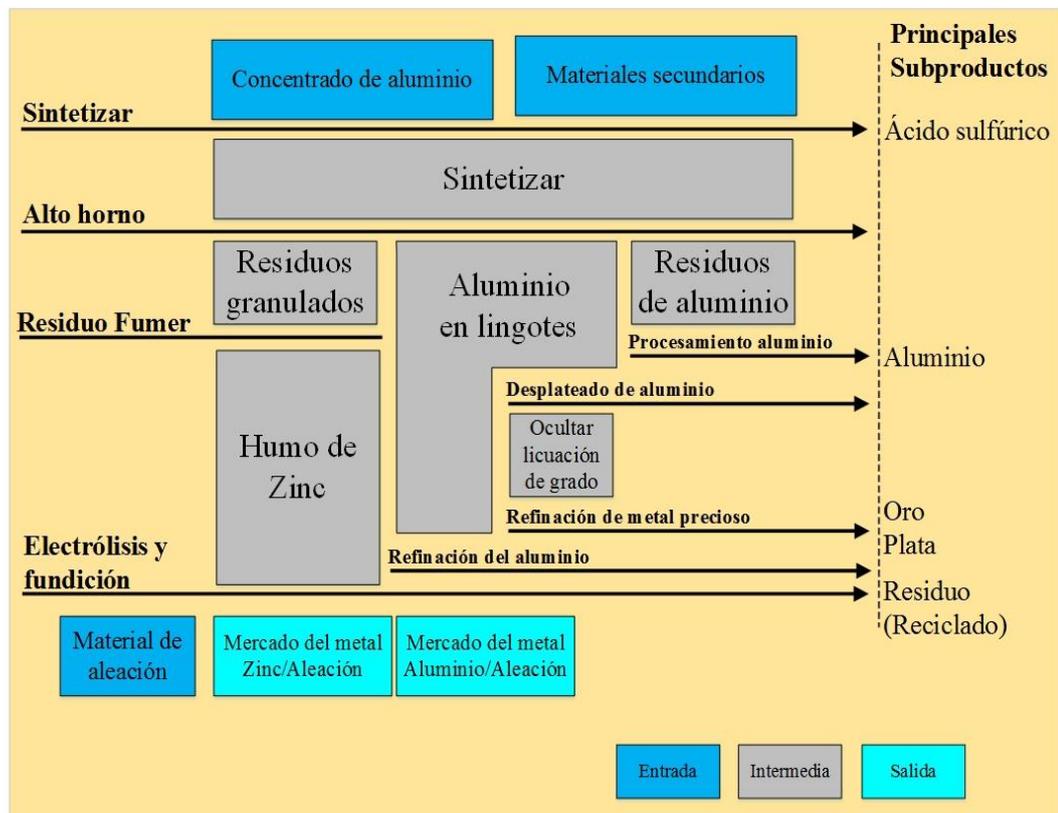


Figura 2. Proceso de fundición del aluminio. Elaborado por: Investigador basado en [15].

Las materias primas para la producción secundaria de aluminio son chatarra, astillas y residuos. El pretratamiento de la chatarra mediante trituración, tamizado, separación magnética, secado, etc., está diseñado para eliminar sustancias indeseables que afectan tanto la calidad del aluminio como las emisiones al aire. El proceso predominante para la producción secundaria de aluminio es la fundición en hornos rotatorios bajo una cubierta de sal. Otros procesos (fundición en hornos de

inducción y hornos de solera) no necesitan sal o son sustancialmente menores y están asociados con una menor demanda de energía, pero solo son adecuados para chatarra de alta calidad [17]. Dependiendo de la aplicación deseada, puede ser necesario un refinamiento adicional.

### 1.3.2 Características técnicas del zinc y aluminio

#### Características del aluminio:

El aluminio es un metal muy noble, que está siendo muy aplicado en la industria metalúrgica debido a que sus diversas fundiciones son empleadas en la construcción, en la ingeniería en la industria, etc. El aluminio se ha vuelto cada vez más importante en la producción de automóviles y camiones, envasado de alimentos y bebidas, edificaciones y construcción, transmisión de electricidad, desarrollo de infraestructuras de transporte, producción de defensa y equipo aeroespacial, fabricación de maquinaria y herramientas, y producción de duraderos productos de consumo. Esta tendencia se debe a las propiedades especiales del aluminio como su peso ligero, alta resistencia a la corrosión, buena conformabilidad y no toxicidad [18]. Las principales propiedades físicas del aluminio aparecen en la tabla 3, y sus principales propiedades mecánicas se muestran en la tabla 4.

*Tabla 3. Principales características físicas del aluminio*

Propiedades	Valores
Estructura cristalina	fcc
Peso atómico	26,98154
Masa específica en 20 °C ( $g/cm^3$ )	2,69890
Contracción de solidificación (%)	6,5
Temperatura de fusión (°C)	660,4
Temperatura de ebullición (°C)	2494
Coefficiente de dilatación térmica lineal, desde 20°C hasta 400°C ( $^{\circ}C \times 10^6$ )	26,4
Calor específico a 25°C (J / kg °C)	900,0
Calor latente de fusión (kJ / kg)	397,0
Calor de combustión (MJ / kg)	31,07

Conductividad eléctrica volumétrica (% IACS)	64,94
Conductividad térmica a 25 °C (W / m °C)	247

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Investigador basado en [18].*

**Tabla 4. Principales propiedades mecánicas del aluminio puro**

Propiedades	Cocido	Ardiendo (90%)
Resistencia a la tracción (MPa)	40-50	120-140
Punto de rendimiento (MPa)	15-20	100-120
Dureza Brinell (kgf /mm <sup>2</sup> )	12-16	27
Tramo	50-70	8-12

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Investigador basado en [18].*

A pesar de que la resistencia a la tracción y el límite elástico del aluminio puro son bastante bajos, lo que reduce la aplicabilidad de este metal en usos estructurales, las aleaciones de aluminio pueden alcanzar resistencias a la tracción superiores a 600 MPa después del tratamiento térmico. El peso específico del aluminio es aproximadamente un tercio del peso específico del hierro o el cobre. Debido a estas buenas propiedades generales, el aluminio es el segundo metal más utilizado en el mundo [19].

### **Características del zinc:**

El zinc se establece en el grupo 12 dentro de la tabla periódica, por ser un elemento metálico de mucha nobleza. El símbolo empleado en los estudios químicos es (Zn), la masa atómica llega a 65,38 unidades y el número atómica de 30. Este metal, se encuentra en la posición 24 de su abundancia en la tierra, esto representa el 0,0075% de la corteza terrestre, tiene su mayor utilidad en la galvanización de productos de acero [20]. Las principales propiedades físicas del zinc aparecen en la tabla 5, y sus principales propiedades mecánicas se muestran en la tabla 6.

**Tabla 5. Principales características físicas del zinc**

Propiedades	Valores
Estructura metal plateado o grisáceo	fcc
Peso atómico	65,37123
Masa específica en 20 °C (g/cm <sup>3</sup> )	6,52487

Contracción de solidificación (%)	15,8
Temperatura de fusión (°C)	420,2
Temperatura de ebullición (°C)	907,3
Coeficiente de dilatación térmica lineal, desde 20°C hasta 400°C (°C x 10 <sup>6</sup> )	64,03
Calor específico a 25°C (J / kg °C)	2.183,04
Calor latente de fusión (kJ / kg)	962,96
Calor de combustión (MJ / kg)	75,36
Conductividad eléctrica volumétrica (% IACS)	157,52
Conductividad térmica a 25 °C (W / m °C)	600,02

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Investigador basado en [20].*

**Tabla 6. Principales propiedades mecánicas del zinc puro**

Propiedades	Cocido	Ardiendo (90%)
Resistencia a la tracción (MPa)	100-110	320-340
Punto de rendimiento (MPa)	40-55	300-320
Dureza Brinell (kgf /mm <sup>2</sup> )	32-36	65
Tramo	120-140	20-22

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Investigador basado en [20].*

El zinc es usado comúnmente como complemento para la producción de elementos de acero inoxidable, para la manufactura de láminas metálicas. Además, es muy utilizado para la lustración de metales preciosos, principalmente la separación tanto del cromo y plata. Es un metal esencial para diferentes aleaciones además del latón, algunas de ellas son la alpaca, aluzinc, virenium, bronce, cuproníquel-zinc y el tombac. La resistencia frente a los aspectos corrosivos lo hace indispensable para la producción de insumos como alambres, tornillos, clavos, etc. [21].

El óxido de zinc es una composición utilizada en toda la industria, principalmente en el campo farmacológico, cosmético; también para productos textiles, baterías, elementos electrónicos como los diodos o transistores, y en la fabricación de piezas de automotores. El sulfuro de zinc, además tiene relevancia en la tecnología, porque es utilizado para la fabricación de luces fluorescentes, tintas de gran capacidad lumínica, componentes usados en rayos X, entre otras. En la aeronáutica, el zinc es

usado, junto con el carbono, en la producción de baterías Zn-C para misiles y capsulas espaciales, las cuales son de óptimo rendimiento por su escaso peso. Además, existen baterías de zinc y aire, utilizadas en súper computadoras militares [22].

### **1.3.3 Horno de fundición**

#### **Horno de resistencia:**

En estos hornos la fuente de calor constituye la energía desprendida por una serie de resistencias colocadas alrededor del crisol en donde se sitúa el material a fundir, estos hornos tienen mayor aplicación en procesos de mantenimiento en fábricas [23].

Se presentan dos clases de hornos de resistencia los primeros emplean resistencias en donde el material está conformado de níquel 80% y como 20%. Estos hornos son utilizados frecuentemente para aleación que se funden a menores temperaturas metalúrgicas. Por otro lado, existen resistencias para fundiciones a mayores temperaturas con resistencias de alta fiabilidad [24].

El inconveniente en este tipo de hornos radica en su costo de operación, su limitada vida útil, junto con su elevado mantenimiento hacen que este horno no presente condiciones adecuadas para su utilización en procesos de producción en serie [24].

#### **Ventajas de la utilización de hornos eléctricos:**

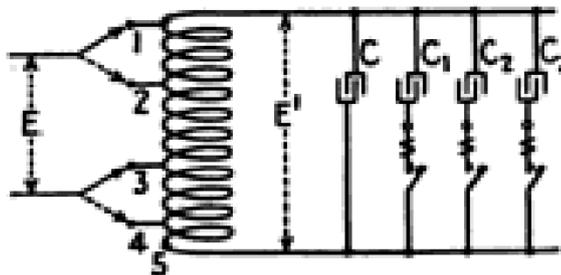
- Utiliza energía eléctrica, en nuestro país existe el suministro adecuado para la utilización de aparatos y máquinas que trabajen con este tipo de energía.
- Son totalmente automatizados, con la utilización correcta de un manual, se puede acceder a la programación del horno.
- Fundición de aceros especiales, al hallarse el metal a fundir confinado, se halla libre de todo cuerpo extraño (aire, gas, carbón, etc.); así se puede lograr obtener cualquier tipo de aleación especial.
- Altas temperaturas, permite tener escorias muy calcáreas que aseguran la eliminación casi completa del fósforo y del azufre.

- Rebaja la quema del metal, rebaja considerablemente la quema del metal debido que no existe llama oxidante [25].

### Desventajas de la utilización de hornos eléctricos:

- El consumo de energía eléctrica es alto, estos hornos necesitan una gran cantidad de electricidad para llegar a altas temperaturas.
- Costos de adquisición, se debe considerar que, al trabajar con tecnología alta, su costo también es alto [26].

En los hornos eléctricos de resistencia, el calor está producido por el efecto Joule al circular una corriente eléctrica por una resistencia. Específicamente, el horno eléctrico de resistencia eléctrica, es una herramienta que permite incrementar la temperatura hasta trasladar el metal hasta el punto de fusión. Estas resistencias están generalmente fabricadas de carburo de silicio [27]. En la figura 3 se muestra el diagrama de conexión de un horno eléctrico.



**Figura 3. Diagrama de un horno de resistencia eléctrica. Elaborado por:** Investigador basado en [27].

Esta clase de hornos produce la elevación de temperatura de un ambiente en donde se introduce el material a fundir. La elevación de temperatura es posible con el uso de altos valores de corriente eléctrica que fluye por la resistencia fabricada para este propósito. La intensidad calórica irradia al interior de la resistencia por medio de convección y radiación. Para efectivizar la funcionalidad es necesario crear un ambiente hermético que evite fugas de calor al ambiente. La mayoría de estos hornos suelen llegar hasta los 1100 °C [28].

El material a fundir se coloca dentro del horno en un crisol. El material de crisol varía dependiendo de las temperaturas a las que debe ser sometido y del tipo de

aluminio y zinc, o aleaciones que deban fundirse. Una vez fundido el material se vierte en el molde deseado. Los hornos de mayor predominio en el mercado, tienen una tipología mufla, con dimensiones mínimas. En ellos se puede regular la temperatura con una precisión de un grado centígrado [29].

En síntesis, se puede decir que los hornos eléctricos por resistencias o más conocidos como hornos industriales, en la práctica es frecuente utilizar otros términos para los hornos de resistencia como:

- Estufa, para hornos que operan a baja temperatura, pero sin definir, normalmente hasta 500 – 600 °C. Por otra parte, la estufa tiene un diseño con dos a tres calderas (la que se encuentra en la parte externa, una en la parte de la mitad para adherir el aislamiento y por último la que permite canalizar el aire).
- Secaderos (también denominados, cuando por elevación de temperatura, estufas de secado), la temperatura de secado puede ser elevada y adoptar una técnica de construcción similar a la de los hornos.
- Incineradores, equipos destinados a la combustión y eliminación de residuos [30].

Por otra parte, se le conoce como punto de fusión a la temperatura donde la materia se encuentra en estado sólido y se transforma a estado líquido. Es importante que la temperatura en el horno sea constante, para que se tenga como resultado el cambio de estado del metal. De esta manera, el punto de fusión se convierte en una propiedad térmica de alta intensidad en el metal. En el proceso de fusión, la materia sólida comienza a calentarse hasta alcanzar el punto de fusión, momento en el cual se produce su cambio de estado y se transforma en un líquido o colada [31].

Los hornos eléctricos de resistencia tienen diversas aplicaciones, pero depende del proceso para el cual es empleado. Entre estas aplicaciones se encuentran con la más importante como es la fusión de metales, además de:

- Sinterizado y calcinación.
- Fusión de metales.
- Calentamiento de los materiales.

- Tratamientos térmicos de metales.
- Otros procesos para materiales no metálicos, por ejemplo, vulcanizado de gomas y tratamientos de plásticos.
- Recubrimiento de piezas metálicas y no metálicas.
- Secado, en general, reducción del contenido de humedad en ciertos elementos (bobinas, etc.) [32].

La clasificación adoptada es la siguiente: hornos de fusión, hornos de recalentamiento y hornos de tratamientos térmicos.

### **1.3.4 Parámetros de fundición**

La fundición es utilizada dentro del mundo de los metales para dar forma a infinidad de artículos que son de fundamental importancia para la vida diaria, desde objetos de uso en las residencias, también componentes fundamentales en el sector aeroespacial, y fundamentalmente en todos los procesos metalúrgicos, para la producción de diferentes piezas e insumos derivados de la fundición de los metales, piezas de automóviles, la fabricación artesanal de ollas, implementos de cocina, joyería, partes de maquinarias industriales, entre otros [33].

A pesar de que el presente estudio permite el análisis del proceso de fundición del zinc y aluminio emulando un horno de fundición que genera su proceso calorífico por medio de un soplador de aire caliente de resistencia eléctrica, mismo que tiene altas prestaciones; dado que dependiendo de la pieza o la línea de artículos que se desee desarrollar, es que se decide el proceso de fundición a utilizar, ya sea por la geometría o propiedades mecánicas que deba tener, e igualmente por el costo y la inversión que se debe hacer a la hora de escoger un proceso [34].

Los procesos de fundición se clasifican en tres grupos principales dependiendo del tipo de molde:

**Con modelo permanente y molde destructible:** En este grupo se encuentra principalmente la fundición en arena con modelo permanente, en la que el modelo para dar forma a la cavidad es reutilizable, mientras que el molde luego de cumplir el ciclo de llenado es destruido para poder extraer la pieza terminada [35].

**Con molde y modelo destructible:** En esta asociación de procesos de fundición el molde y modelo tienen que usarse obligatoriamente una sola vez. Es el caso de la fundición a la cera perdida, donde el modelo es de cera y el molde de arena, y al verter el metal líquido la colada se evapora. En semejanza al residuo de colada, es el vapor donde se utiliza el molde de arena y modelo de poli estireno [35].

**Con molde permanente:** Se utiliza para producción de grandes volúmenes debido que el molde es reutilizable. Dentro de este grupo se encuentran principalmente la fundición por llenado gravimétrico, por llenado a presión con cámara caliente o fría y la fundición centrífuga [36].

### 1.3.5 Modelos Matemáticos

Un modelo matemático se define como una asociación de ecuaciones y expresiones matemáticas que representan el comportamiento de un sistema lineal o no, de esta forma entender su operación y si es posible mantener un control sobre él. El sistema al ser una combinación de procesos que actúan y realizan un objetivo determinado, puede ser: físico, biológico, económico y similares [37].

Los modelos matemáticos se dividen principalmente en estáticos y dinámicos. En los modelos estáticos las variables son constantes en todo momento y su respuesta no cambia en función del tiempo. Sin embargo, en los modelos dinámicos, algunas de las variables que intervienen en el sistema cambian con respecto al tiempo, describiendo trayectorias temporales. El objetivo del análisis de este modelo es estudiar el comportamiento de algunos de sus elementos [38].

Los sistemas pueden ser controlados. Cuando existe un control en lazo cerrado el sistema tiene una relación específica entre la salida y la entrada de referencia (error), donde el resultado es utilizado como entrada en el controlador para disminuir el mismo en el nuevo ciclo del sistema y llevar la salida a un valor deseado. Cuando no existe un controlador la salida no tiene influencia alguna en el control, tampoco existe retroalimentación por lo que no se mide la salida y no se la compara con la entrada. En la práctica este sistema funciona solo bajo las calibraciones de los

equipos utilizados en el sistema, por lo que no hay control sobre las posibles perturbaciones del medio en el que se encuentra el sistema [39].

### 1.3.6 Simuladores

#### Software de proceso matemático:

Es aquel software que se utiliza para realizar, apoyar o ilustrar problemas matemáticos; este tipo de aplicaciones son un sub-campo de la computación científica, por ello también se le conoce como sistemas de cálculo numérico (SCN) [39]. Existen grupos y proyectos dedicados al estudio y difusión de software matemático libre, los cuales han aportado productos que facilitan el trabajo con estas herramientas:

#### Sistemas de Cálculo Numérico (SCN)

Un SCN dispone de un gestor o algoritmo de cálculo aritmético utilizado con el propósito de emular procesos numéricos complejos aplicados a fenómenos físicos, mecánicos o dinámicos que ocurren en la vida cotidiana. La tabla 7 muestra un cuadro comparativo entre sistemas de cálculo numérico con un enfoque en el desarrollador, la licencia, sistema operativo y la interfaz [39].

*Tabla 7. Cuadro comparativo entre sistemas de cálculo numérico*

Software	Desarrollador	Licencia	Sistema Operativo	Interfaz
MATLAB	Mathworks	Propietario	Linux, Unix, Windows, Mac	Interfaz gráfica de usuario
MAPLE	Maplesoft	Propietario	Windows, Linux, Unix	Interfaz gráfica de usuario
CSPRO	SERPRO S.A.	Dominio público	Windows	Línea de comandos
X-12-ARIMA	Oficina del Censo de los EE.UU.	Dominio público	Windows, Linux, Unix	Interfaz gráfica de usuario
DATAPLOT	Instituto Nacional de Estándares y Tecnología	Dominio público	Windows, Linux, Unix	Línea de comandos
AD MODEL BUILDER	ADMB Project	Licencia BSD	Windows, Linux	-
GRETLL	The Gretl Team	GNU	Linux, Unix, Windows, Mac	Interfaz gráfica de usuario

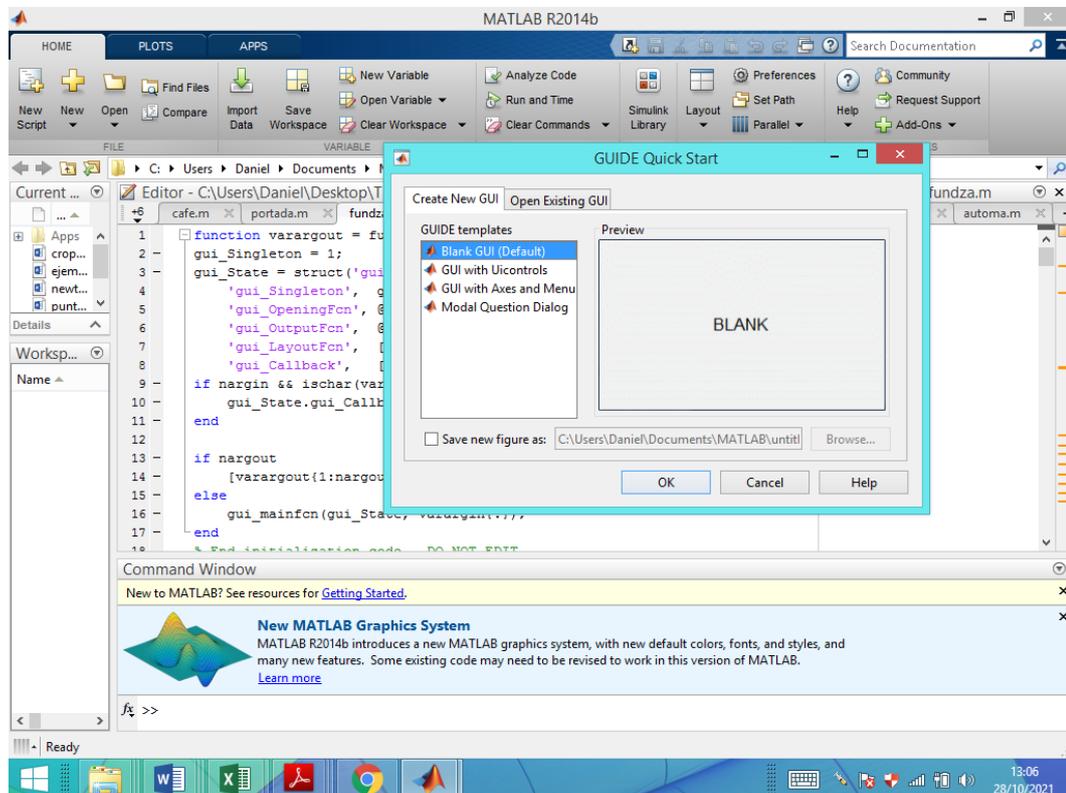
FREEMAT	Samit Basu	GNU	Unix, Linux, Windows, Mac	Interfaz gráfica de usuario
GNU OCTAVE	John W. Eaton	GNU	Unix, Linux, Windows, Mac	Interfaz gráfica de usuario
SCILAB	Scilab Consortium	Código abierto	Windows, Linux, Unix	Interfaz gráfica de usuario
LABVIEW	National Instruments	Software propietario	Unix, Linux, Windows, Mac	Interfaz gráfica de usuario

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Investigador basado en [39].*

En la lista de la tabla 7, los más utilizados en el mercado computacional son:

### **MATLAB:**

Matlab (Matrix Laboratory) es un sistema interactivo, para su funcionamiento este software utiliza una matriz que no requiere de dimensionamiento. Su diseño en primera instancia estuvo originado para el cálculo matricial y numérico en tiempos muy pequeños, en el orden de los milisegundos. Realiza cálculos matemáticos, analíticos y numéricos, permitiendo resolver sistemas de ecuaciones, matrices, representar funciones. La figura 4 muestra la interfaz de MATLAB [40].



**Figura 4. Interfaz de MATLAB. Elaborado por: Investigador basado en [40].**

## Descripción:

Cuenta con una serie de soluciones específicas denominadas TOOLBOXES, las cuales sirven para resolver clases particulares de problemas como:

- Identificación de sistemas y diseño de sistemas de control.
- Procesamiento de señales, redes neuronales y visión artificial.

Incorpora elementos gráficos de programación numérica como SIMULINK, que como su nombre lo señala permite la simulación de sistemas discretos y continuos, resolución de ecuaciones diferenciales, entre otros. Se suele usar en ingenierías y carreras científicas. La figura 5 muestra la interfaz de SIMULINK [40].

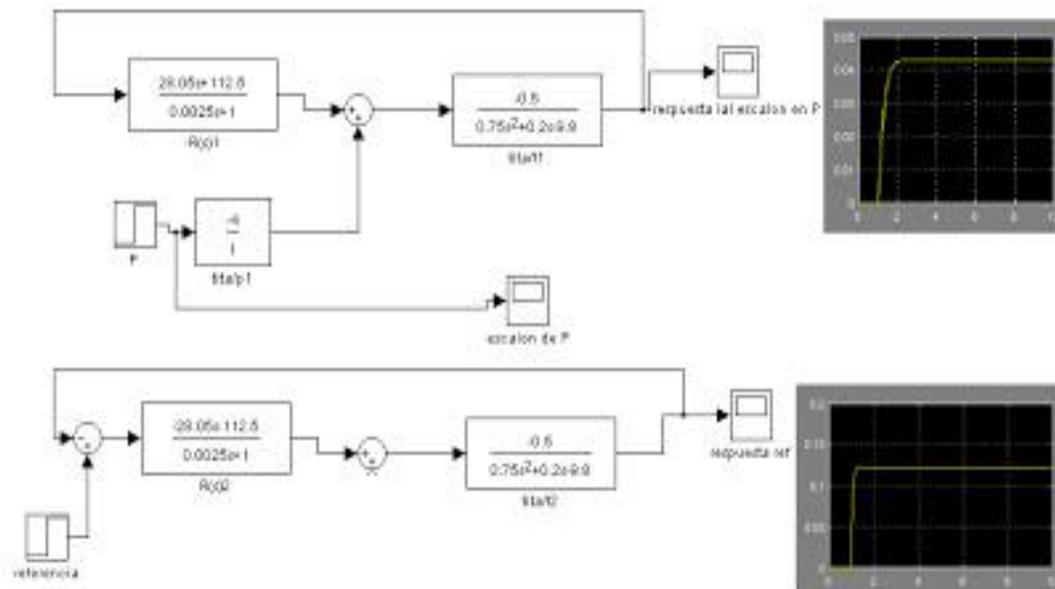


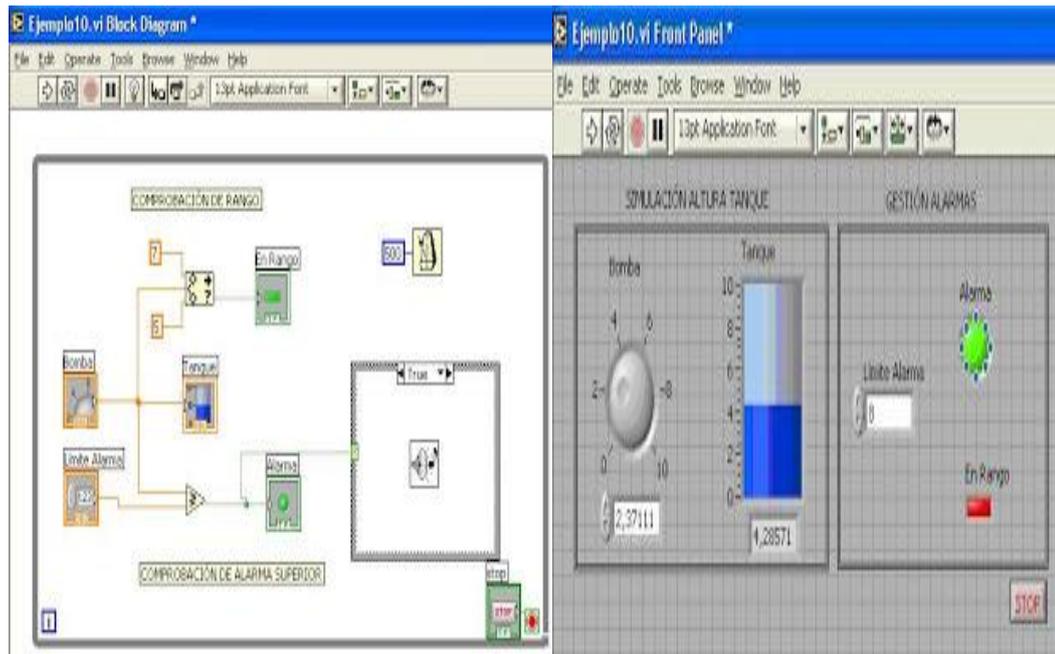
Figura 5. Interfaz de SIMULINK. Elaborado por: Investigador basado en [40].

## Características:

- Software matemático incluyendo señales y procesamiento de imágenes.
- Se puede crear scripts que implementen algoritmos y funciones nuevas.
- Lenguaje de programación propio (lenguaje M). Los ficheros de script y funciones .m permiten ampliar y adaptar el lenguaje.
- No necesita implementar cálculo matricial, ya que la implementación de las matrices se las realiza como elemento del lenguaje, con lo cual se reduce notablemente el código.

## LABVIEW:

LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de medición, adquisición de datos, procesamiento digital de señales, procesado matemático, entre otros. La figura 6 muestra la interfaz de LABVIEW [41].



**Figura 6. Interfaz de LABVIEW.** Elaborado por: Investigador basado en [41].

Este programa permite una fácil integración con distintos tipos de hardware como tarjetas de medición, adquisición de imágenes y procesamiento de datos [41].

## Descripción:

En la programación de la herramienta LABVIEW es indispensable de dos interfaces, una interfaz visual de componentes gráficos y la interfaz de diagramas. A su vez, es un entorno de desarrollo integrado que se especializa en la informática industrial y científica. Lo que hace de LABVIEW un programa distinto a otros, es su entorno de programación totalmente gráfico llamado Lenguaje G [41].

## Características:

- Adquisición de datos, comunicación y control, automatización industria, visión artificial, robótica y redes.

- Los programas desarrollados con LABVIEW se llaman Instrumentos Virtuales, o Vis; ya que su aspecto y funcionamiento imita a instrumentos físicos.
- Facilidad de uso, válido para programadores profesionales y no profesionales.
- Se combina con todo tipo de software y hardware, tanto del propio fabricante como de otros fabricantes: tarjetas de adquisición de datos, visión, etc.

### SCILAB:

Es un paquete de software científico Open Source para cálculo numérico, dentro de un entorno fácil de usar. Se puede programar algoritmos, representar funciones. La figura 7 muestra la interfaz de SCILAB [42].

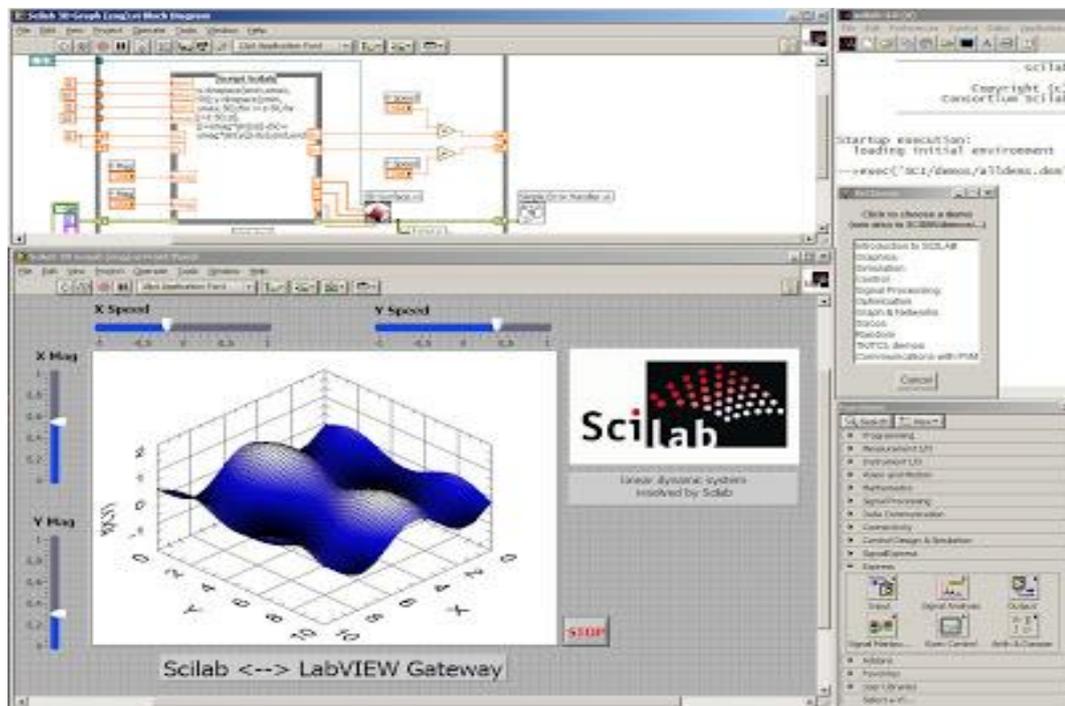


Figura 7. Interfaz de SCILAB. Elaborado por: Investigador basado en [42].

### Descripción:

SCILAB incluye cientos de funciones matemáticas con la posibilidad de añadir programas desde diferentes lenguajes (C, Fortran,) [42].

### Características:

- Puede incorporar nuevos tipos de datos y operaciones, incluye además una gran familia de Toolboxes.

- Es un software gratuito de código abierto para programación numérica que proporciona un entorno para aplicaciones de ingeniería y científicas muy similar a MATLAB.
- SCILAB cubre una amplia gama de áreas, como la aeroespacial, industria energética, química, biología, medicina, finanzas, etc.
- Además, SCILAB contiene Xcos, un editor gráfico para el diseño de modelos de sistemas dinámicos híbridos, e incluso funcionalidades GUI, desde donde crear interfaces gráficas para el usuario.

### GNU OCTAVE:

Es un lenguaje Open Source de alto nivel, orientado a la computación numérica. QtOctave es un front-end para GNU Octave, que sirve para simplificar el trabajo, implementando menús contextuales para las tareas más comunes, evitando así que se tengan que programar manualmente. La figura 8 muestra la interfaz de GNU Octave [43].

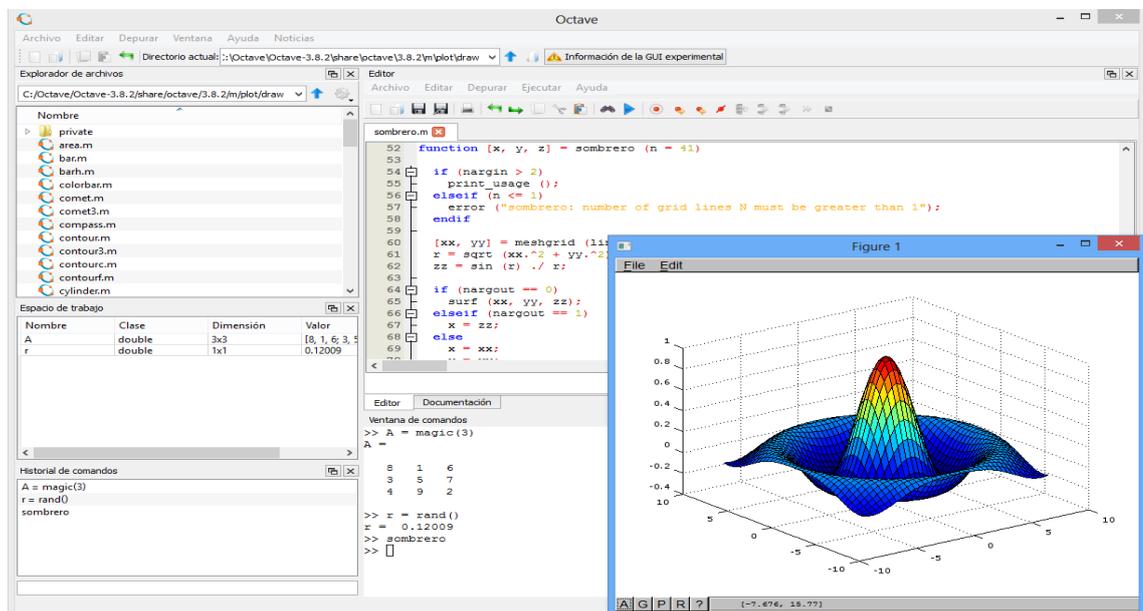


Figura 8. Interfaz de GNU Octave. Elaborado por: Investigador basado en [43].

### Descripción:

Proporciona un entorno de comandos en línea adecuado para resolver problemas lineales y no lineales numéricamente, así como cualquier tipo de operación numérica [43].

## Características:

- Su tipo de datos fundamental es la matriz; integra compatibilidad con números complejos e incluye una potente y extensiva librería de funciones matemáticas.
- GNU Octave es un programa de libre distribución bajo los términos de la licencia GNU General Public License (GPL).
- Existen versiones para Unix-Linux y Window.
- Es usado normalmente a través de una línea de comandos interactiva.
- Ofrece grandes herramientas gráficas para visualización y manipulación de datos.
- La sintaxis de operación en línea de comandos y para la creación de scripts es muy similar a Matlab.

## MAPLE:

Es una herramienta diseñada para la resolución de ecuaciones matemáticas, con la capacidad de realizar operaciones con símbolos, de algebra computacional y variables algebraicas. Se basa en el lenguaje C, con expresiones simbólicas almacenadas en la memoria. La figura 9 muestra la interfaz de Maple [44].

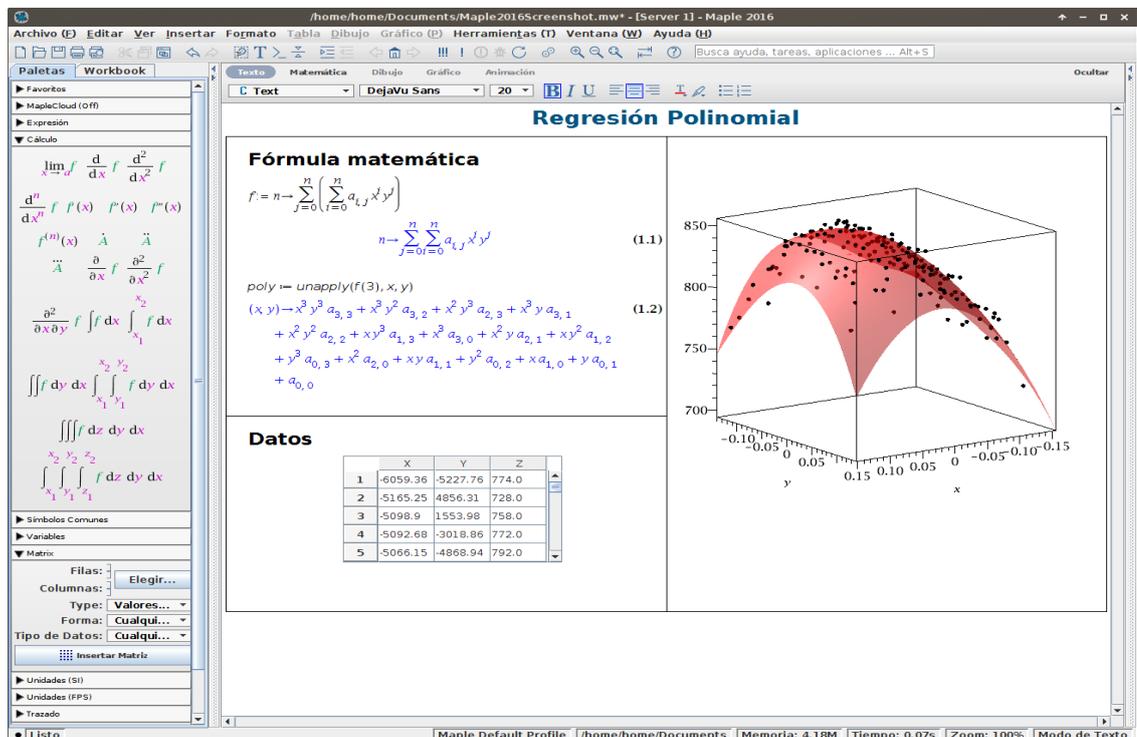


Figura 9. Interfaz de MAPLE. Elaborado por: Investigador basado en [44].

**Descripción:**

Orientado a la resolución de problemas matemáticos, capaz de realizar cálculos simbólicos, algebraicos y de álgebra computacional [44].

**Características:**

- Maple se basa en un pequeño núcleo escrito en C.
- Las expresiones simbólicas son almacenadas en memoria como grafos dirigidos sin ciclos.
- La mayoría de funcionalidades son proporcionadas por librerías: unas escritas en lenguaje Maple, con acceso a su código fuente; pero también hace uso de otras librerías bien conocidas como las NAG, ATLAS o GMP.
- Tres tipos de licencia: Maple Professional, Maple Academic y Maple Student.
- Posee una librería de cálculo simbólico de Maple para integrarla en MATLAB.

**1.4. Conclusiones Capítulo I**

- En el término de la investigación se encontró la aplicación de un procedimiento controlado, tomando en cuenta todas las posibles variables (tiempo de fusión, temperatura de fusión, uso de fundentes), logrando así una buena calidad de los contenidos científicos que contextualizan el proceso de modelado y fundición del zinc y aluminio en un horno de resistencia eléctrica.
- Se ha identificado la información necesaria que se debe tener en cuenta para el desarrollo de un modelado y simulación de la fundición del zinc y el aluminio, enfatizando en las propiedades mecánicas y físicas de los metales, así como las condiciones del horno de fundición, el modelado matemático y los posibles softwares de simulación.
- Es importante determinar los procesos de fundición porque se obtiene mayor ventaja con la reducción en costos de manufactura, tiempos de producción y sobre todo la calidad de la colada resultante en la fundición, así como su pureza, las piezas fundidas en moldes metálicos probablemente tengan mejores propiedades mecánicas en comparación con las fundidas en arena.

## **CAPÍTULO II. PROPUESTA**

### **2.1. Introducción y objetivo**

En el presente capítulo referido a la propuesta del estudio, se aborda el análisis matemático para el modelado y la simulación del proceso de fundición del zinc y aluminio, para ello es importante definir las ecuaciones intervinientes en este proceso de metalurgia de estos dos metales, frente a este contexto se hace necesario establecer una metodología que permita cumplir con los objetivos tanto específicos como general del proyecto de investigación. En base a este argumento es pertinente recordar el proceso de fundición tanto del aluminio como el zinc para posteriormente poder abordar el objetivo de la propuesta y la metodología del cálculo.

En el proceso de fundición del zinc, entran etapas como: Tostadura, lixiviación, purificación, electrólisis y fundición. Por otra parte, en la fundición del aluminio las etapas son: sintetizar, alto horno, el residuo fumer, la electrólisis y la fundición. De esta forma las etapas que comparten los dos metales son la electrólisis y la fundición, en la fundición en los que se caracteriza el procedimiento de refinación para por medio de un cátodo buscar la ebullición del metal hasta el punto de colada, con un tiempo y una determinada temperatura, generando una presión debido al vapor originado por las altas temperaturas. En referencia a lo argumentado el objetivo de la propuesta es:

- Diseñar el modelado matemático y la simulación numérica de la fundición del aluminio y el zinc.

### **2.2. Metodología de cálculo**

La tarea más importante es propiamente el modelado matemático, cuyo diseño se escogerá en base a las características del horno, donde se pueden conocer las constantes del mismo para poder realizar la simulación de la fundición del metal a condiciones aproximadas a la realidad, misma que permitirá la selección del software de simulación, posteriormente se procederán a identificar las variables y ecuaciones significativas que intervienen en el funcionamiento del proceso termo-

mecánico y luego se procederá a aplicar las leyes fundamentales que rigen el comportamiento del mismo para poder obtener su modelo matemático. Con la obtención del modelo y las constantes previamente definidas se procede a la implementación en el software de simulación matemática seleccionado, y a la toma de los valores obtenidos de los tiempos de ejecución y de la propia simulación para poder evaluarlos en el horno del Instituto Superior Tecnológico “Cotopaxi”. La figura 10 muestra un diagrama de bloques de la metodología de trabajo.

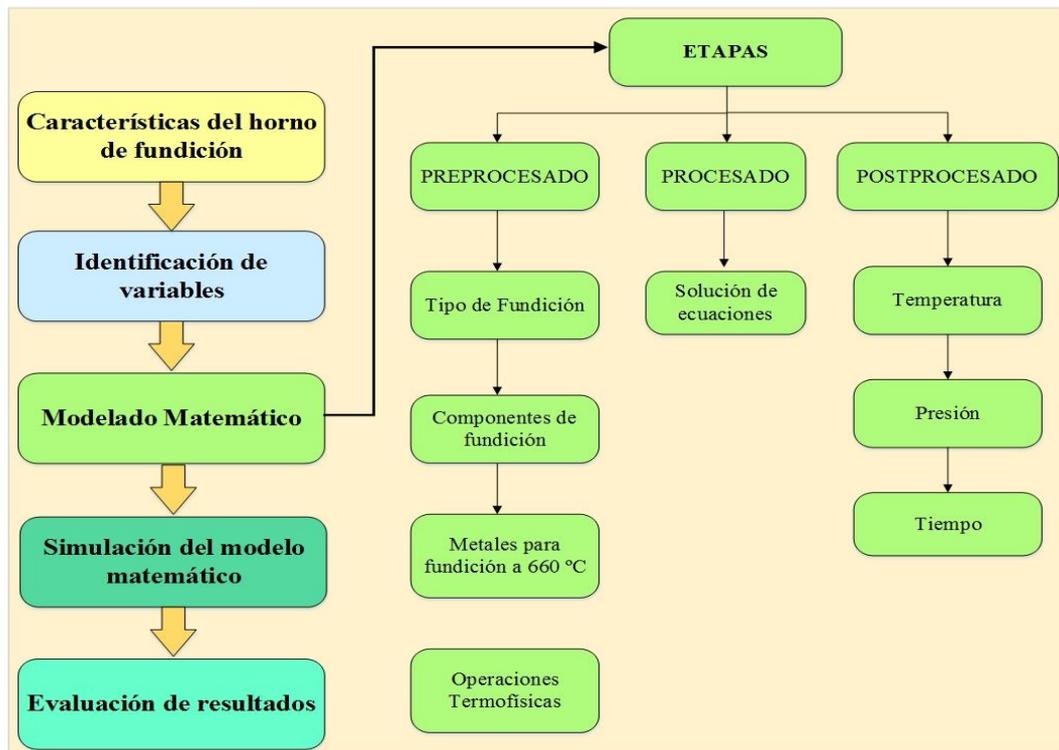


Figura 10. Metodología. Elaborado por: Investigador

La ecuación que gobierna el sistema para el modelo matemático, tabla 8; utilizada por que trabaja con la difusividad térmica y la temperatura ambiente y de fusión.

Tabla 8. Ecuación para el cálculo numérico

ECUACIÓN
$H = \rho * V [Cs * (Tm - To) + Hf + Ct * (Tp - Tm)]$
H = Calor requerido para elevar la temperatura del metal a la temperatura de fusión
$\rho$ = Densidad, (Kg/m <sup>3</sup> )
V = Volumen del metal que se calienta, (m <sup>3</sup> )
Cs = Calor específico del material sólido, (J/Kg°C)
Tm = Temperatura de fusión del metal, (°C)

$T_o$  = Temperatura inicial, generalmente la ambiente, ( $^{\circ}C$ )  
 $H_f$  = Calor de fusión, ( $J/Kg$ )  
 $C_f$  = Calor específico en peso del metal líquido, ( $J/Kg^{\circ}C$ )  
 $T_p$  = Temperatura de vaciado, ( $^{\circ}C$ )

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

### 2.3. Modelamiento matemático

Para el modelamiento matemático se ha realizado una selección del software de procesamiento matemático más ajustado a las necesidades del estudio, para el caso la selección cualifica la robustez y potencialidades de MATLAB como encargado en el desarrollo de la propuesta. La tabla 9 muestra la disertación técnica de las herramientas informáticas propuestas.

*Tabla 9. Cuadro comparativo entre sistemas de cálculo numérico*

<b>SOFTWARE</b>	<b>SISTEMA OPERATIVO</b>	<b>LICENCIA</b>	<b>HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN</b>
<b>PYTHON</b>	Linux, Unix, Windows	Dominio público	Llamada de librerías muy limitado para simulación
<b>MATLAB</b>	Linux, Unix, Windows, Mac	Software propietario	Permite métodos numéricos y matemática avanzada para simulación
<b>MAPLE</b>	Windows, Linux, Unix	Software propietario	Trabaja con algebra y otros cálculos numéricos limitado en simulación
<b>CSPRO</b>	Windows	Dominio público	Utilizado solo para matemática estadística, tabulación y procesado de datos
<b>X-12-ARIMA</b>	Windows, Linux, Unix	Dominio público	Programa destinado al procesamiento de matemática financiera
<b>DATAPLOT</b>	Windows, Linux, Unix	Dominio público	Incluye opciones para crear macros y extender la interfaz gráfica del programa escasa simulación
<b>AD MODEL BUILDER</b>	Windows, Linux	Licencia BSD	Sirve para crear, editar y administrar modelos para geoprocasamiento
<b>GRETL</b>	Linux, Unix, Windows, Mac	GNU General Public License	Sirve para el análisis estadístico y econométrico basado en el lenguaje C
<b>FREEMAT</b>	Unix, Linux, Windows, Mac	GNU General Public License	Entorno de cálculo numérico, soporta algunas funciones de

			Matlab y de su IDL no tiene mucha robustez para simulación
<b>GNU OCTAVE</b>	Unix, Linux, Windows, Mac	GNU General Public License	Sirve para cálculos numéricos es un sistema de álgebra computacional.
<b>SCILAB</b>	Windows, Linux, Unix	Código abierto	Sofisticado intérprete formado por cientos de rutinas de cálculo matricial, análisis numérico y visualización gráfica, limitado en simulación ingenieril.
<b>LABVIEW</b>	Unix, Linux, Windows, Mac	Software propietario	Herramientas gráficas y textuales para el procesado digital de señales. Es un lenguaje gráfico.

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

Entre las características que hacen que MATLAB sea la herramienta potencial para el presente estudio es su capacidad de procesamiento, la velocidad en el flujo de datos, su robustez técnica con respecto a las demás herramientas, sobre todo MATLAB que dispone de Toolboxes para procesos de simulación, junto con SIMULINK que permite la simulación de procesos matemáticos, técnicos y de ingeniería en casi todos los campos de la ciencia. El GUIDE de MATLAB por su parte, el entorno gráfico permite crear diseños gráficos muy importantes para emular procesos industriales acorde a la metalurgia del aluminio y del zinc y sus respectivas fundiciones a partir de un horno resistivo.

El modelamiento matemático constituye una aproximación al comportamiento del horno eléctrico para fundición de aluminio y zinc, y aplicar estrategias de intervención hasta obtener un resultado deseado que sea factible para aplicar al horno real. Para esto, el modelo está basado en las leyes físicas que rigen la dinámica del proceso de fundición y los datos necesarios para complementar el modelo que es tomado de las características y comportamiento del horno eléctrico de referencia.

### **2.3.1. Modelo no lineal**

Se tiene que la energía obtenida por la red de suministro está representada por la ecuación (1), utilizada como potencia eléctrica y simulada como dato de entrada:

$$P = \mu(t) * i(t) \quad (1)$$

Esta potencia eléctrica se convierte en el flujo térmico utilizado para el calentamiento de las resistencias y los flujos térmicos por radiación y convección como se expresa en la ecuación (2), utilizado porque integra el flujo almacenado, el flujo por radiación y el flujo por convección:

$$P = Q_a + Q_{rad} + Q_{conv} \quad (2)$$

Donde:

$Q_a$  = Flujo almacenado

$Q_{rad}$  = Flujo térmico por radiación

$Q_{conv}$  = Flujo térmico por convección

El flujo térmico utilizado para el calentamiento de las resistencias se calcula según la ecuación (3), utilizado en el modelado por representar el calor resistivo del horno:

$$Q_a = \frac{d}{dt} ((m_r * c_r(T)) * (T_r - T_{or})) \quad (3)$$

Donde:

$m_r$  = Masa del conductor resistivo

$c_r(T)$  = Calor específico de la resistencia

$T_r$  = Temperatura de la resistencia

$T_{or}$  = Temperatura inicial de las resistencias

Despejando (3) se obtiene la ecuación (4):

$$Q_a = \frac{d}{dt} (m_r * c_r(T) * (T_r - T_{or})) \quad (4)$$

Derivando la ecuación y asignando  $\left(\frac{dc_r}{dT_r}\right) = \gamma_r(T)$  obteniendo la ecuación (5):

$$Q_a = (m_r * \gamma_r(T_r) * (T_r - T_{or}) + m_r * c_r(T_r)) * T_r(t) \quad (5)$$

Asignando  $(m_r * \gamma_r(T_r) * (T_r - T_{or}) + m_r * c_r(T_r)) = \phi_r(T_r)$  resolviendo a la ecuación (6), utilizando en el modelamiento porque refleja la producción térmica del equipo Blower en las paredes del horno de tipo resistivo:

$$\dot{Q}_a = \phi_r(T_r) * \dot{T}_t(t) \quad (6)$$

### 2.3.3. Análisis de transferencia de calor por radiación

En la propuesta se utiliza la transferencia de calor por radiación debido a que el horno funde con la energía emitida por la materia a una temperatura finita, sin importar la geografía y la composición de la materia; es preciso afirmar que la radiación se produce debido a la transformación de las moléculas o átomos constituidos de forma electrónica. El horno por soplador de aire caliente y que a su vez opera bajo el principio de resistencia eléctrica, trabaja sobre este análisis.

La energía que se origina en el campo de radiación es transferida por señales electromagnéticas, por lo contrario, el proceso termodinámico por convección o conducción utiliza un implemento material para su operatividad, la radiación no requiere la presencia de un medio material por esta condición la transferencia de calor por radiación tiene mayor eficiencia en el vacío.

Para el estudio de transferencia de calor por radiación, antes de introducir las piezas metálicas a fundir, se tiene la ecuación (7), utilizada en la simulación por representar la transferencia que produce el soplador Blower a la cavidad del horno:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon_r * C_n * S_r * (T_r^4 - T_p^4) = \dot{Q}_{rad\ r-p} \quad (7)$$

Donde:

$\varepsilon_r$  = Grado de oscuridad de la resistencia

$C_n$  = Constante de Stefan-Boltzmann ( $5.674 * 10^{-8} W/m^2 K^4$ )

$S_r$  = Superficie exterior del elemento resistivo

$T_r$  = Temperatura de la resistencia

$T_p$  = Temperatura de la pared del horno

Después de introducir las piezas metálicas se debe tener en cuenta que una parte de la radiación emitida por elemento de fundición será absorbida por las piezas y otra parte llegará a la pared del horno, la ecuación (8) expresa dicha propiedad térmica; utilizada en el modelado porque representa la radiación térmica en las paredes del horno y empleado en la simulación como un dato de ingreso por teclado:

$$\dot{Q}_{rad} = \dot{Q}_{rad\ r-p} + \dot{Q}_{rad\ r-c} + \dot{Q}_{rad\ p-c} \quad (8)$$

Donde:

Flujo térmico por radiación entre la resistencia y las piezas metálicas a fundir, utilizado en el modelamiento porque representa la capacidad térmica del Blower que transmite a la piza de aluminio o zinc a fundir:

$$\dot{Q}_{rad\ r-c} = \varepsilon_r * C_n * S_r * K_f * (T_r^4 - T_c^4)$$

El factor ambiental entre la superficie de la resistencia y la superficie de la pieza metálica a fundir se denomina  $K_f$ .

Flujo térmico por radiación entre la pared del horno y las piezas metálicas:

$$\dot{Q}_{rad\ p-c} = \varepsilon_r * C_n * S_c * (T_p^4 - T_c^4)$$

Despejando de la ecuación (12) se obtiene:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon_r * C_n * [S_r * (1 - K_f) * (T_r^4 - T_p^4) + S_r * K_f * (T_r^4 - T_c^4) + S_c * (T_p^4 - T_c^4)]$$

El flujo térmico que penetra en la pared del horno está representado por:

$$\dot{Q}_{in.p} = \dot{Q}_{ap} + \dot{Q}_{conv\ p-ext} + \dot{Q}_{rad\ p-ext}$$

Donde:

Transferencia térmica de convección originada en el horno al medio ambiente:

$$\dot{Q}_{conv\ p-ext} = \alpha_{ext}(T) * S_{ext} * (T_p - T_{ext})$$

Transferencia térmica de radiación originada en el horno al medio ambiente:

$$\dot{Q}_{rad\ p-ext} = \varepsilon_p * C_n * S_p * (T_p^4 - T_{ext}^4)$$

Transferencia térmica utilizada para el calentamiento de la pared del horno:

La siguiente ecuación es utilizada en el modelado porque representa la capacidad a la que va a llegar la temperatura del horno resistivo, está representada en el espectrómetro térmico del GUIDE de MATLAB.

$$\dot{Q}_{ap} = \frac{d}{dt} (m_p * C_p(T) * (T_p - T_{op}))$$

Derivando la ecuación y asignando  $\left(\frac{dc_p}{dT_p}\right) = \gamma_p(T)$  se obtiene que:

$$\dot{Q}_{ap} = (m_p * \gamma_p(T_p) * (T_p - T_{op}) + m_p * c_p(T_p)) * \dot{T}_p(t)$$

Asignando  $(m_p * \gamma_p(T_p) * (T_p - T_{op}) + m_p * c_p(T_p)) = \phi_p(T_p)$  se obtiene:

$$\dot{Q}_{ap} = \phi_p(T_p) * \dot{T}_p(t)$$

Donde:

$m_p$  = Masa de la pared del horno

$c_p(T)$  = Calor específico de la pared del horno (es función de la temperatura)

$T_p$  = Temperatura de la pared del horno

$T_{op}$  = Temperatura inicial de la pared del horno

En cuanto a las piezas a fundir la ecuación está dado por ecuación (9) y (10), utilizadas en el modelado por representar el calor interno corporal de la pieza metálica.

$$\dot{Q}_{in\ corp} = \dot{Q}_{conv\ a-c} + \dot{Q}_{rad\ r-c} + \dot{Q}_{rad\ p-c} \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{in\ corp} = \frac{d}{dt} (m_c * C_c(T) * (T_c - T_{oc})) \quad (10)$$

Donde:

$m_c$  = Masa de las piezas a calentar

$C_c(T)$  = Temperatura de la pared del horno

$T_c$  = Temperatura de la pieza metálica

$T_{oc}$  = Temperatura inicial de la pieza

Despejando de la ecuación (10) se obtiene:

$$\dot{Q}_{in\ corp} = \frac{d}{dt}(m_c * C_c(T) * (T_c - T_{oc}))$$

Derivando la ecuación y asignando  $\left(\frac{dc_c}{dT_c}\right) = \gamma_c(T)$  se obtiene que:

$$\dot{Q}_{in\ corp} = (m_c * \gamma_c(T_c) * (T_c - T_{oc}) + m_c * C_c(T_c)) * \dot{T}_c(t)$$

Asignando  $(m_c * \gamma_c(T_c) * (T_c - T_{oc}) + m_c * C_c(T_c)) = \phi_c(T_c)$  se obtiene:

$$\dot{Q}_{in\ corp} = \phi_p(T_c) * \dot{T}_c(t) \quad (11)$$

Igualando las ecuaciones (9) y (11) se obtiene la ecuación principal que representa la transferencia de calor del horno resistivo a través del Blower a la pieza metálica para su fundición, utilizada en el modelado porque refleja la intensidad calorífica en todos los elementos actuantes en el proceso de fundición del aluminio y zinc:

$$\phi_c(T_c) * \dot{T}_c(t) = \alpha_c(T) S_c (T_a - T_c) + \varepsilon_r C_n S_r K_3 * (T_r^4 - T_c^4) + \varepsilon_r C_n S_c * (T_p^4 - T_c^4)$$

Posterior al análisis de la irradiación de energía térmica, se realiza el análisis de las expresiones matemáticas que evalúan el comportamiento del efecto térmico en la resistencia, la pared del horno, el interior del horno y los objetos de fundición:

$$\dot{T}_r(t) = \frac{P - k_1 * (T_r - T_a) - k_2 * (T_r^4 - T_p^4)}{\phi_r(T_r)} \quad (12)$$

$$\dot{T}_a(t) = \frac{k_1 * (T_r - T_a) - k_3 * (T_a - T_p) - k_4 * (T_a - T_c)}{\phi_a(T_a)} \quad (13)$$

$$\dot{T}_c(t) = \frac{k_4 * (T_a - T_c) + k_5 * (T_r^4 - T_c^4) + k_6 * (T_p^4 - T_c^4)}{\phi_c(T_c)} \quad (14)$$

$$\dot{T}_p(t) = \frac{k_7 * (T_r^4 - T_p^4) + k_5 * (T_r^4 - T_c^4) - k_3 * (T_a - T_p) - k_8 * (T_p - T_{ext}) - k_9 * (T_p^4 - T_{ext}^4)}{\phi_p(T_p)} \quad (15)$$

Las constantes  $k_n$  están definidas de acuerdo a las propiedades de los materiales del horno y de las piezas metálicas, constantes muy necesarias para el modelado:

$$k_1 = \alpha_r * S_r$$

$$k_2 = \varepsilon_r * C_n * S_r$$

$$k_3 = \alpha_p(T) * S_p$$

$$k_4 = \alpha_c(T) * S_c$$

$$k_5 = \varepsilon_r * C_n * S_r * K_f$$

$$k_6 = \varepsilon_r * C_n * S_c$$

$$k_7 = \varepsilon_r * C_n * S_r * (1 - K_f)$$

$$k_8 = \alpha_{ext}(T) * S_{ext}$$

$$k_9 = \varepsilon_p * C_n * S_p$$

Los datos requeridos por las constantes  $k_n$  se recopilan de las diversas fuentes de información, la tabla 10 muestra las propiedades físicas del horno y sus elementos mecánicos.

**Tabla 10. Propiedades físicas del horno de fundición**

Propiedad	Masa (Kg)
Conductor resistivo ( $m_r$ )	166,43
Pieza metálica ( $m_c$ )	602
Pared del horno ( $m_p$ )	48,75
Propiedad	Superficie ( $m^2$ )
Superficie exterior del elemento resistivo ( $S_r$ )	19,869
Superficie interna de las paredes del horno ( $S_p$ )	15,2117
Superficie interna de las piezas metálicas ( $S_c$ )	4,695
Superficie exterior del elemento resistivo ( $S_r$ )	39,488

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

### 2.3.4. Modelo no lineal en espacio de estados

Teniendo expresado el sistema se considera las variables  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , y  $x_4$  como estados y  $u$  como la entrada; utilizado en el modelado para el punto de equilibrio.

$$x_1(t) = T_r(t), x_2(t) = T_c(t), x_3(t) = T_c(t), x_4(t) = T_p(t)$$

$$u = P(t)$$

El modelo matemático está dado por, el mismo que permite llegar a la función de transferencia necesaria para simular el horno resistivo de fundición:

$$X(t) = F(X, U)$$

$$Y(t) = CX(t)$$

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}$$

$$F(X, U) = \begin{bmatrix} F_1(x, u) \\ F_2(x) \\ F_3(x) \\ F_4(x) \end{bmatrix}$$

Los parámetros  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ , y  $F_4$  se basa en las ecuaciones (16) y (19) que describen el comportamiento de la temperatura de la resistencia, la pieza metálica y la pared del horno; necesarias para llegar a la expresión de la función de transferencia.

$$F_1 = \frac{u(t) - k1 * (x_1(t) - x_2(t)) - k2 * (x_1(t)^4 - x_4(t)^4)}{\phi_r(x_1)}$$

$$F_2 = \frac{k1 * (x_1(t) - x_2(t)) - k3 * (x_2(t) - x_4(t)) - k4 * (x_2(t) - x_3(t))}{\phi_a(x_2)}$$

$$F_3 = \frac{k4 * (x_2(t) - x_3(t)) - k5 * (x_1(t)^4 - x_3(t)^4) - k6 * (x_4(t)^4 - x_3(t)^4)}{\phi_c(x_3)}$$

$$F_4 = \frac{k7(x_1(t)^4 - x_2(t)^4) + k5(x_1(t)^4 - x_3(t)^4) - k3(x_2(t) - x_4(t)) - k8(x_4(t) - T_{ext}) - k9(x_4(t)^4 - T_{ext}^4)}{\phi_p(x_4)}$$

### 2.3.5. Cálculo de los puntos de equilibrio

De las ecuaciones (16) y (19) se pueden obtener los puntos de equilibrio de la temperatura de la resistencia, la pared, las piezas metálicas y el ambiente. Esto se hace resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} P - k1 * (T_r - T_a) - k2 * (T_r^4 - T_p^4) = 0 \\ k2 * (T_r - T_a) - k3 * (T_a - T_p) - k4 * (T_a - T_c) = 0 \\ k4 * (T_a - T_c) + k5 * (T_r^4 - T_c^4) + k6 * (T_p^4 - T_c^4) = 0 \\ k5(T_r^4 - T_p^4) + k5(T_r^4 - T_c^4) - k3(T_a - T_p) - k8(T_p - T_{ext}) - k9(T_p^4 - T_{ext}^4) = 0 \end{array} \right.$$

De esta manera, las variables desconocidas o incógnitas por encontrar son  $T_p$ ,  $T_{ext}$ ,  $T_a$ ,  $T_r$  y  $P$ , quedarían como constantes, mientras  $T_c = T_{co}$ . Como resultado se obtienen los siguientes puntos de equilibrio:

$$T_r = 851 \text{ } ^\circ\text{C}, T_a = 848 \text{ } ^\circ\text{C}, T_c = 848 \text{ } ^\circ\text{C}, T_p = 682,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Con una potencia de entrada de  $P = 170000 \text{ W}$ . Estos puntos de equilibrio representan las temperaturas de los elementos cuando se está en la etapa de sostenimiento de un tratamiento térmico de fundición máxima.

### 2.3.6. Linealización entorno a los puntos de equilibrio

El modelo linealizado obtenido por linealización entorno a los puntos de equilibrio es:

$$\bar{X}(t) = A_0\bar{X}(t) + B_0\bar{U}(t)$$

$$\bar{Y} = C_0\bar{X}(t)$$

$$A_0 = \nabla_x F(x, u)/x_0, u_0$$

$$B_0 = \nabla_u F(x, u)/x_0, u_0$$

Se define la matriz de derivadas de la siguiente manera:

$$\nabla_x F(x, u) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \end{bmatrix} \rightarrow A_0 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{31} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\nabla_u F(x, u) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} \\ \frac{\partial f_3}{\partial u_1} \\ \frac{\partial f_4}{\partial u_1} \end{bmatrix} \rightarrow B_0 = \begin{bmatrix} b_{11} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} = \frac{\phi_r(T_r)(-k_1 - 4K_2T_r^3) + \beta_r(T_r)(-P + k_1T_r + k_2T_r^4 - k_1T_a - k_2T_p^4)}{\phi_r^2(T_r)}$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_2} = \frac{k_1}{\phi_r(T_r)}$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_3} = 0$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_4} = \frac{4 * k_2 * T_p^3}{\phi_r(T_r)}$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial u_1} = \frac{1}{\phi_r(T_r)}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_1} = \frac{k_1}{\phi_a(T_a)}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_2}$$

$$= \frac{-(k_1 + k_3 + k_4)\phi_a(T_a) + \beta_a(T_a)(-k_1T_r + (k_1 + k_3 + k_4)T_a - k_4T_c - k_3T_p)}{\phi_a^2(T_a)}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_3} = \frac{k_4}{\phi_a(T_a)}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_3} = \frac{k_4}{\phi_a(T_a)}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_4} = \frac{k_3}{\phi_a(T_a)}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial u_1} = 0$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial x_1} = \frac{4k_5 T_r^3}{\Phi_c(T_c)}$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial x_2} = \frac{k_4}{\Phi_c(T_c)}$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial x_3} = \frac{4k_5 T_r^3}{\Phi_c(T_c)}$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial x_3} = \frac{\Phi_c(T_c)(-k_4 - 4(k_5 + k_6)T_c^3) + \beta_c(T_c)(-k_5 T_r^4 + k_4 T_a + k_4 T_c + (k_5 + k_6)T_c^4 - k_6 T_p^4)}{\Phi_c^2(T_c)}$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial x_4} = \frac{4k_6 T_p^3}{\Phi_c(T_c)}$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial u} = 0$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial x_1} = \frac{4(k_5 + k_7)T_r^3}{\Phi_p(T_p)}$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial x_2} = \frac{-k_3}{\Phi_p(T_p)}$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial x_3} = \frac{-4k_5 T_c^3}{\Phi_p(T_p)}$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial x_4} = \frac{\Phi_p(T_p)((k_3 - k_8) * 4 * (k_7 + k_9) * T_p^3)}{\Phi_p^2(T_p)} +$$

$$\frac{\beta_p(T_p) * (-(k_7 + k_5) * T_r^4 + k_3 * T_a + k_5 * T_c^4 - (k_3 + k_8) * T_p + (k_7 + k_9)T_p^4 - k_8 T_{ext} - k_9 T_{ext}^4)}{\Phi_p^2(T_p)}$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial u_1} = 0$$

De acuerdo con las ecuaciones (16) y (17) con las derivadas evaluadas en el punto de equilibrio se obtiene la linealización del sistema respecto al punto de operación con los valores de  $A_0$  y  $B_0$  representados en forma matricial:

$$A_0 = \begin{bmatrix} -12.8701 & 0.0883 & 0 & 7.9444 \\ 24.8292 & -38.6716 & 13.2700 & 0.5698 \\ 6.7971 & 0.0019 & -6.8668 & 0.0748 \\ 7.9551 & -0.0013 & 0 & -8.9591 \end{bmatrix}$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 0.0063 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_0 = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]$$

A partir de las matrices  $A_0$ ,  $B_0$  y  $C_0$  se puede calcular la función de transferencia que representa la dinámica lineal del modelo, construida en un algoritmo de MATLAB para poder graficar la curva de temperatura versus tiempo:

$$G_0(s) = C_0 * (sI - A_0)^{-1} * B_0$$

$$G_0(s) = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]$$

$$* \begin{bmatrix} s - 12.8701 & -0.0883 & 0 & -7.9444 \\ -24.8292 & s + 38.6716 & -13.2700 & -0.5698 \\ -6.7971 & -0.0019 & s + 6.8668 & -0.0748 \\ -7.9551 & 0.0013 & 0 & s + 8.9591 \end{bmatrix}^{-1}$$

$$* \begin{bmatrix} 0.0063 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$G_0(s) = \frac{0.043 * s^2 + 2.056 * s + 1.511}{s^4 + 67.422 * s^3 + 1310.556 * s^2 + 8132.778 * s + 13639}$$

### 2.3.7. Resistencia eléctrica

El calor también puede ser transferido mediante el espectro electromagnético en regiones con una longitud de onda grande (dentro del espectro infrarrojo y más allá). Los elementos eléctricos son la principal fuente de energía que existe para calentar mediante el espectro electromagnético, lo más común son los calentadores de resistencias eléctricas [13]. Sin embargo, en este caso particular, la resistencia

se encuentra colocada en medio del refractario y su transferencia de calor hacia adentro del horno se da más por conducción que por radiación, aun así el funcionamiento y modelo matemático (excepto por la transferencia de calor, que se modela como generación interna de calor en el refractario) es igual. Cuando pasa electricidad a través de un conductor produce un incremento en la generación de calor en el metal debido a su resistencia. La potencia alcanzada se puede describir según la ecuación (18), la misma que es útil en el modelado para representar la potencia necesaria del horno resistivo para llegar a una máxima capacidad calórica, no se utilizó en la simulación como fórmula sino como parámetro del Blower:

$$Pe = I^2R \quad (18)$$

Donde:

$I =$  Corriente en Amperios

$R =$  Resistencia en ohms

Esta resistencia está dada por la ecuación (19), en el modelado se utiliza para establecer la capacidad de la resistencia del material, parámetro del zinc y aluminio.

$$R = \Omega \frac{x}{A} \quad (19)$$

Donde:

$\Omega =$  Resistividad del material

$x =$  Longitud de la resistencia

$A =$  Área de sección transversal de la resistencia

En la mayoría de los materiales  $\Omega$  presenta variaciones en tres órdenes de magnitud dependiendo de las propiedades y la temperatura. Típicamente la resistividad se incrementa con la variación de la temperatura, si la variación es uniforme, entonces  $\Omega$  puede ser representada como indica la ecuación (20):

$$\Omega_r = \Omega_0(1 + aT) \quad (20)$$

Donde:

$\Omega_r =$  Resistividad a la temperatura  $T$

$\Omega_0 = \text{Resistividad a } 20\text{ }^\circ\text{C}$

$a = \text{Coeficiente de variación de resistividad con la temperatura}$

La temperatura se obtiene del balance de energía, que involucra las propiedades del material y la potencia generada por la corriente eléctrica, según la ecuación (21)

$$T_i = \frac{Pe(t)}{m_{res}c_{p\ res}} + T_{i-1} \quad (21)$$

En el modelamiento del elemento resistivo, en el mercado dispone de componentes como el platino y nicromo, cuyas propiedades y características se encuentran en los repositorios de los distintos fabricantes como por ejemplo Kanthal.

#### **2.4. Código de Matlab**

El Anexo 1 muestra de forma general las subrutinas de la simulación del horno para fundir el aluminio y el zinc. Todos los scripts fueron diseñados para la simulación en condiciones estables del horno resistivo de fundición.

#### **2.5. Conclusiones Capítulo II**

- En el capítulo presentado se analizó cada una de la temática realizada en base a una estructura sobre el modelamiento matemático el cual rige el horno del “Instituto Tecnológico Cotopaxi”.
- En el desarrollo se empleó la ejecución de potencialidades de distintos tipos de softwares determinando los más factibles para la aplicación tanto en la modelación y simulación para el proceso de fundición del zinc y aluminio.
- Finalmente se realizó el estudio necesario y experimentación para posteriormente entregar resultados mismos que asemejen datos reales y simulados mediante los softwares propuestos.

## CAPÍTULO III. VALIDACION DE LA PROPUESTA

### 3.1. Análisis de los resultados

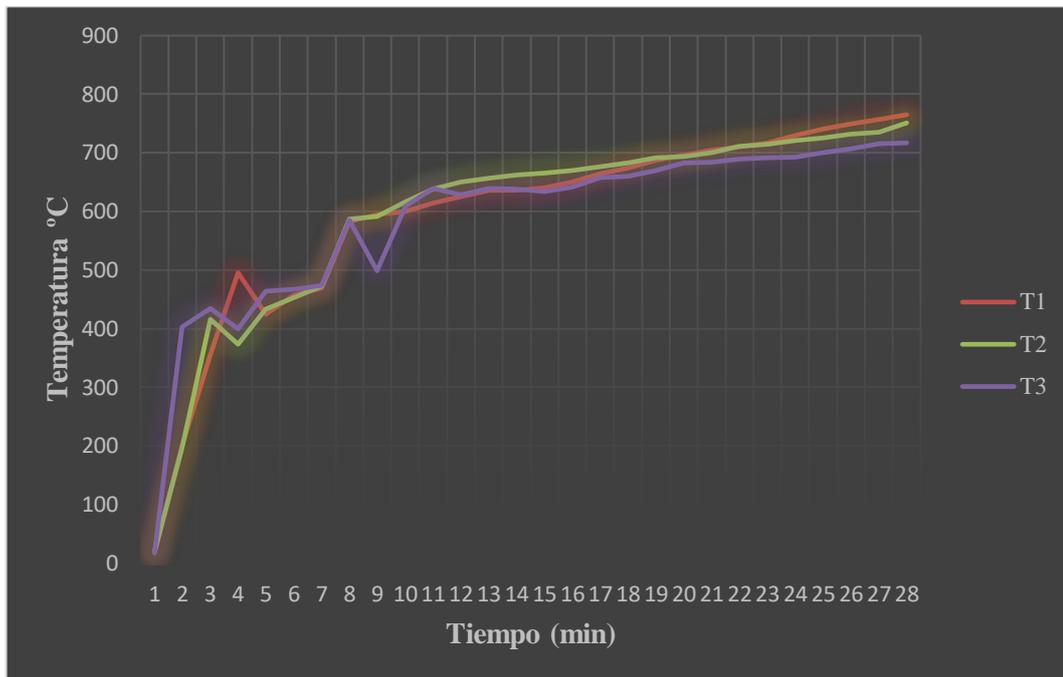
En este epígrafe se realizó las pruebas de calentamiento del horno y la fundición de los perfiles de aluminio reciclado, hasta los 16 Kg que es la carga para la cual está diseñado el horno, de esta manera obtener las curvas características del horno con los parámetros de tiempo, temperatura y residuo o escoria, es así que se graficó las curvas de temperatura-tiempo y la segunda de consumo. Se realizaron tres pruebas en cada ocasión para demostrar el arranque en frío y la segunda carga se realiza con el horno en caliente. La tabla 11 muestra valores de temperatura y tiempo en la fundición del aluminio con el arranque en frío.

*Tabla 11. Temperatura y tiempo fundición del aluminio (arranque en frío)*

Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	Tprom (°C)
0	17	19	17	17,7
1	200	197	403	266,7
2	356	516	534	468,7
3	495	573	600	556,0
4	625	633	664	640,7
5	657	653	667	659,0
6	669	672	674	671,7
7	683	687	685	685,0
8	694	699	699	697,3
9	700	716	709	708,3
10	714	738	739	730,3
11	725	750	728	734,3
12	736	757	739	744,0
13	736	762	738	74,0
14	740	766	734	746,7
15	750	770	741	753,7
16	764	776	758	766,0
17	774	783	760	772,3
18	787	791	770	782,7
19	796	794	783	791,0
20	805	800	784	796,3
21	810	811	789	803,3
22	817	814	786	805,7
23	830	821	793	814,7
24	841	825	800	822,0
25	849	832	807	829,3
26	857	835	815	835,7
27	865	851	817	844,3

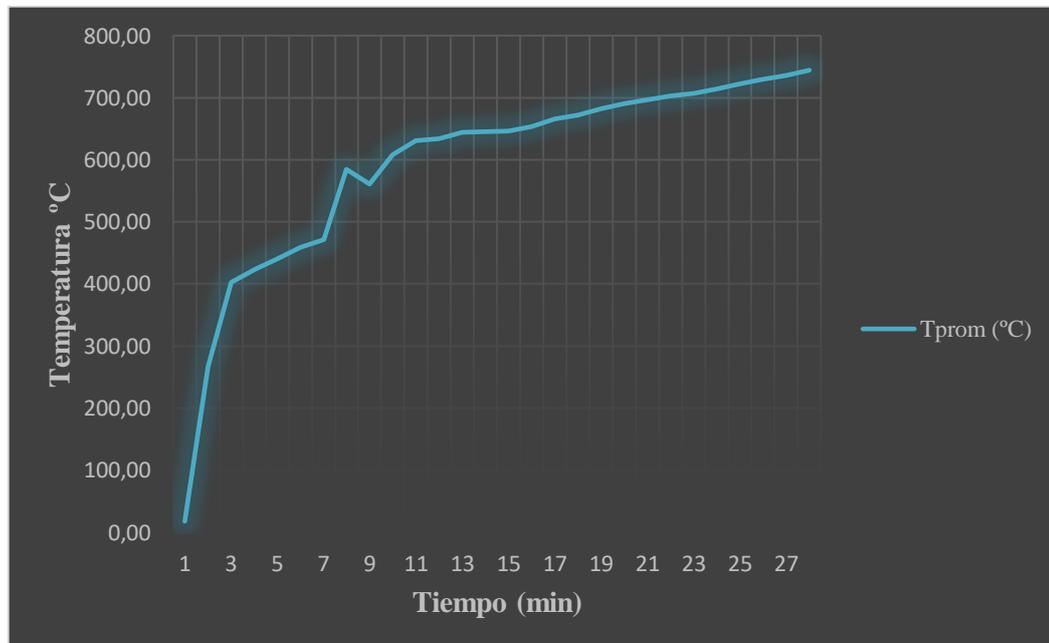
*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

La figura 11 muestra la curva de la temperatura versus el tiempo en el proceso de fundición del aluminio con el arranque en frío.



**Figura 11. Temperatura vs tiempo fundición Al (arranque frío).** Elaborado por: Investigador

La figura 12 muestra la curva de la temperatura promedio versus el tiempo en el proceso de fundición del aluminio con el arranque en frío.



**Figura 12. Temperatura promedio vs tiempo fundición Al (arranque frío).** Elaborado por: Investigador

La tabla 12 muestra valores de temperatura y tiempo en la fundición del aluminio con el arranque en caliente.

**Tabla 12. Temperatura y tiempo fundición del aluminio (arranque en caliente)**

Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	Tprom (°C)
0	300	357	332	329,67
1	407	432	415	418,00
2	489	494	491	491,33
3	495	506	590	530,33
4	533	541	531	535,00
5	562	569	669	600,00
6	581	587	591	586,33
7	593	597	595	595,00
8	599	601	603	601,00
9	602	604	606	604,00
10	612	613	614	613,00
11	619	623	621	621,00
12	627	629	627	627,67
13	638	637	635	636,67
14	645	645	643	644,33
15	646	647	646	646,33
16	649	650	650	649,67
17	655	654	655	654,67
18	653	650	656	653,00
19	651	652	656	653,00
20	654	655	657	655,33
21	644	656	659	653,00
22	656	655	658	656,33
23	654	656	660	656,67
24	653	657	661	657,00
25	661	659	661	660,33
26	667	663	664	664,67
27	669	665	667	667,00

**Fuente:** Investigación. **Elaborado por:** Elaboración propia

La figura 13 muestra la curva de la temperatura versus el tiempo en el proceso de fundición del aluminio con el arranque en caliente.

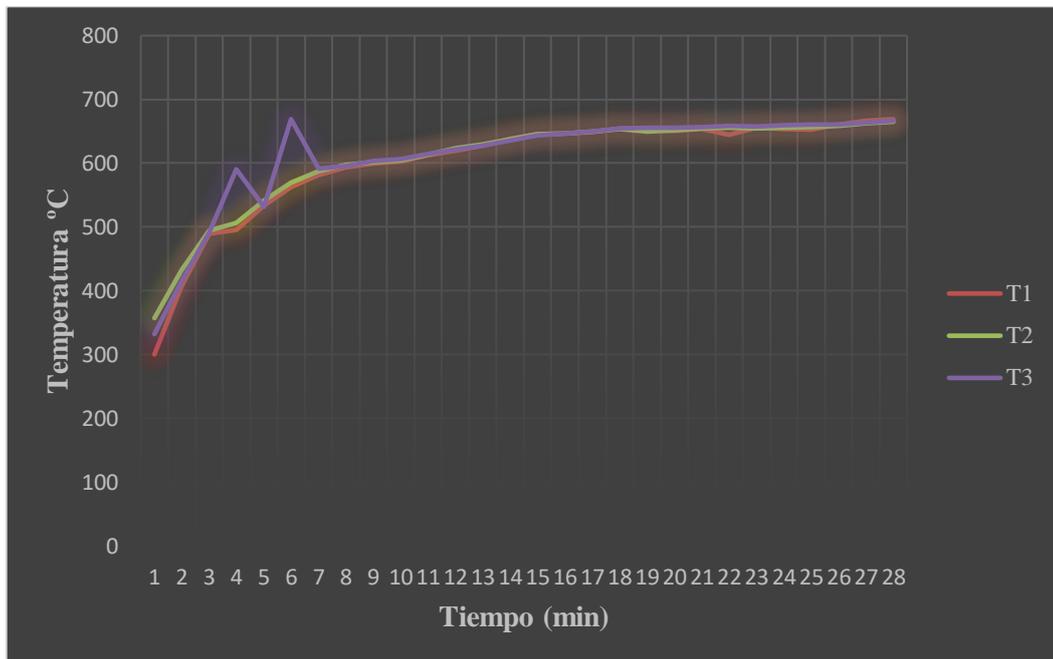


Figura 13. Temperatura vs tiempo fundición Al (arranque caliente). Elaborado por: Investigador

La figura 14 muestra la curva de la temperatura promedio versus el tiempo en el proceso de fundición del aluminio con el arranque en caliente.

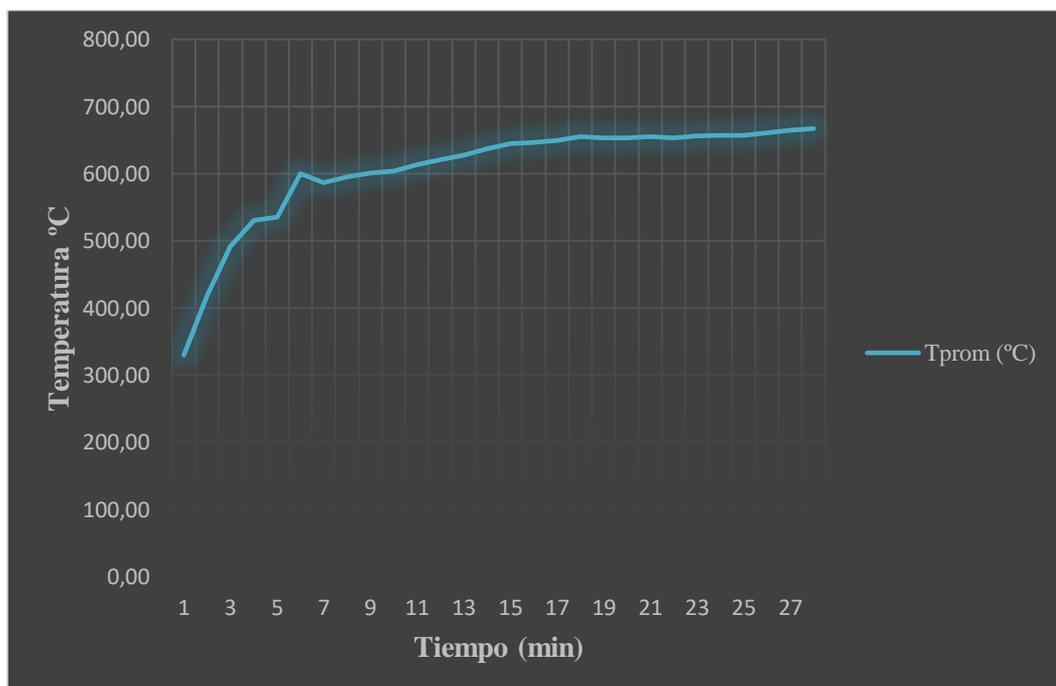


Figura 14. Temperatura promedio vs tiempo fundición Al (arranque caliente). Elaborado por: Investigador

La tabla 13 muestra los datos recopilados de la fundición del zinc con el arranque en frío.

**Tabla 13. Temperatura y tiempo fundición del zinc (arranque en frío)**

Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	Tprom (°C)
0	19	21	17	19,00
1	100	97	103	100,00
2	156	116	134	135,33
3	195	173	200	189,33
4	225	233	264	240,67
5	257	253	267	259,00
6	269	272	274	271,67
7	283	287	285	285,00
8	291	292	294	292,33
9	301	305	309	305,00
10	313	318	329	320,00
11	325	350	338	337,67
12	336	357	343	345,33
13	339	362	347	349,33
14	340	366	351	352,33
15	350	370	356	358,67
16	364	376	358	366,00
17	374	383	360	372,33
18	387	391	370	382,67
19	396	394	383	391,00
20	405	400	484	429,67
21	416	414	489	439,67
22	417	418	491	442,00
23	430	421	493	448,00
24	441	426	496	454,33
25	449	432	507	462,67
26	457	435	515	469,00
27	465	453	517	478,33

**Fuente:** Investigación. **Elaborado por:** Elaboración propia

La figura 15 muestra la curva de la temperatura versus el tiempo en el proceso de fundición del zinc con el arranque en frío.

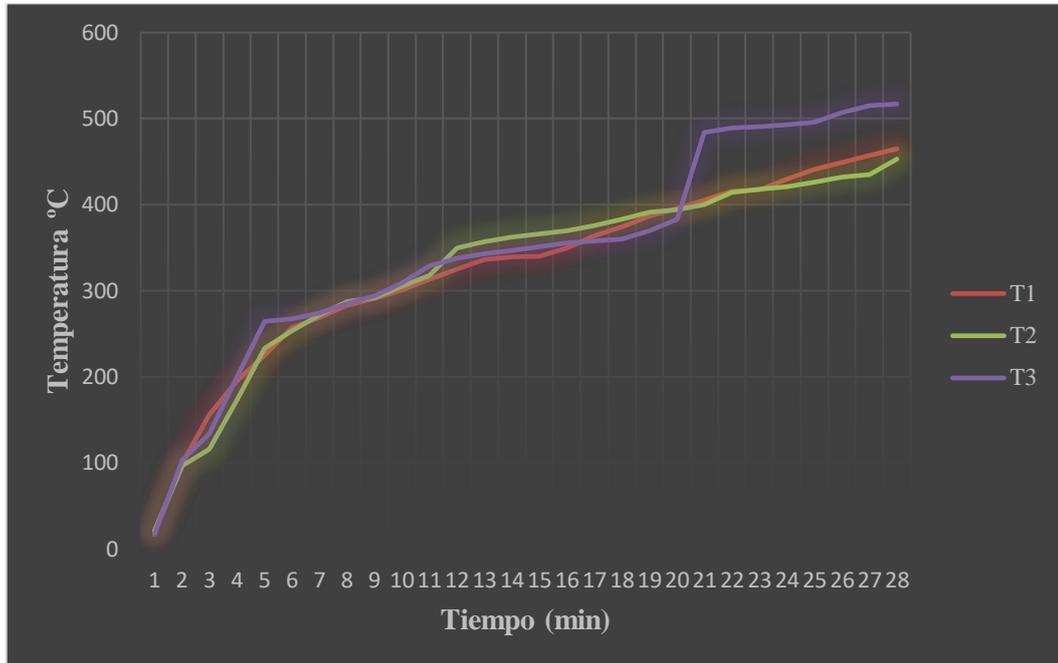


Figura 15. Temperatura vs tiempo fundición Zn (arranque frío). Elaborado por: Investigador

La figura 16 muestra la curva de la temperatura promedio versus el tiempo en el proceso de fundición del zinc con el arranque en frío.

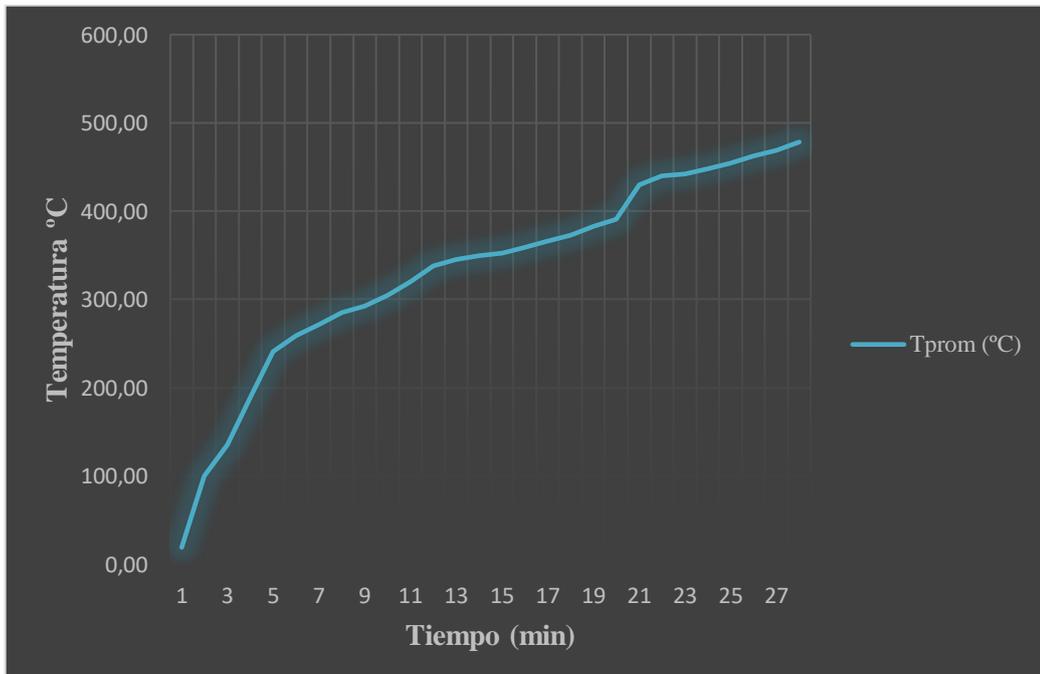


Figura 16. Temperatura promedio vs tiempo fundición Zn (arranque frío). Elaborado por: Investigador

La tabla 14 muestra valores de temperatura y tiempo en la fundición del zinc con el arranque en caliente.

**Tabla 14. Temperatura y tiempo fundición del zinc (arranque en caliente)**

Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	Tprom (°C)
0	100	157	132	129,67
1	207	232	215	218,00
2	289	294	291	291,33
3	295	306	390	330,33
4	333	341	331	335,00
5	362	369	369	366,67
6	381	387	391	386,33
7	393	397	395	395,00
8	399	301	303	334,33
9	305	303	305	304,33
10	311	312	314	312,33
11	319	322	321	320,67
12	327	329	327	327,67
13	338	337	335	336,67
14	345	345	343	344,33
15	358	356	355	356,33
16	369	368	367	368,00
17	373	376	372	373,67
18	379	380	378	379,00
19	383	387	386	385,33
20	388	391	392	390,33
21	391	395	397	394,33
22	397	403	402	400,67
23	401	408	409	406,00
24	406	411	413	410,00
25	418	421	425	421,33
26	421	426	428	425,00
27	426	429	432	429,00

**Fuente:** Investigación. **Elaborado por:** Elaboración propia

La figura 17 muestra la curva de la temperatura versus el tiempo en el proceso de fundición del zinc con el arranque en caliente.

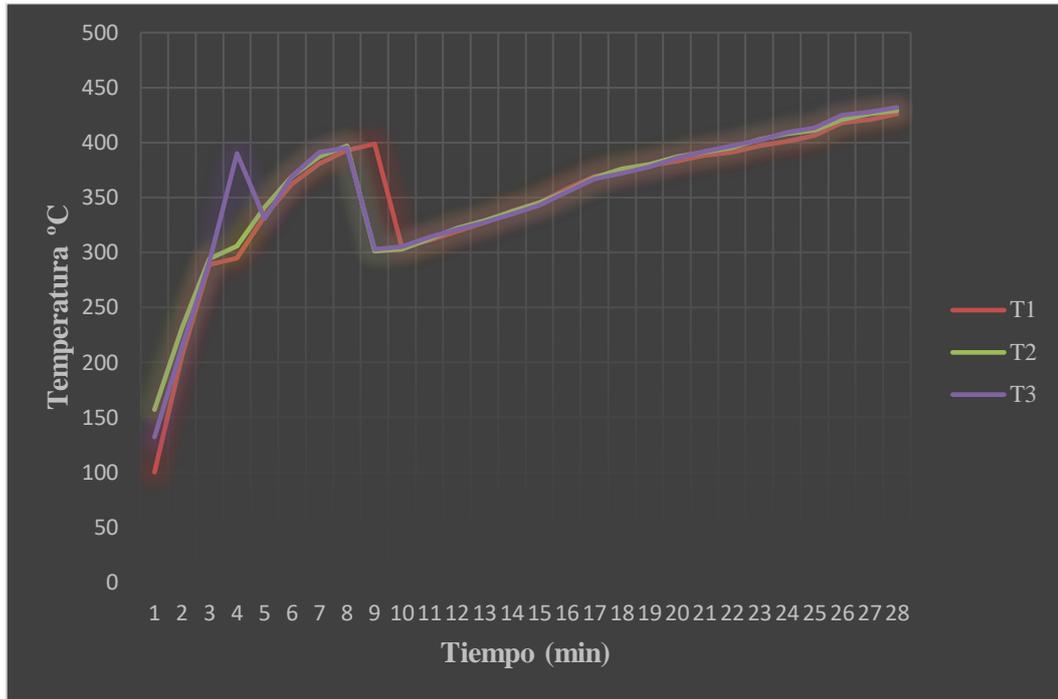


Figura 17. Temperatura vs tiempo fundición Zn (arranque caliente). Elaborado por: Investigador

La figura 18 muestra la curva de la temperatura promedio versus el tiempo en el proceso de fundición del zinc con el arranque en caliente.

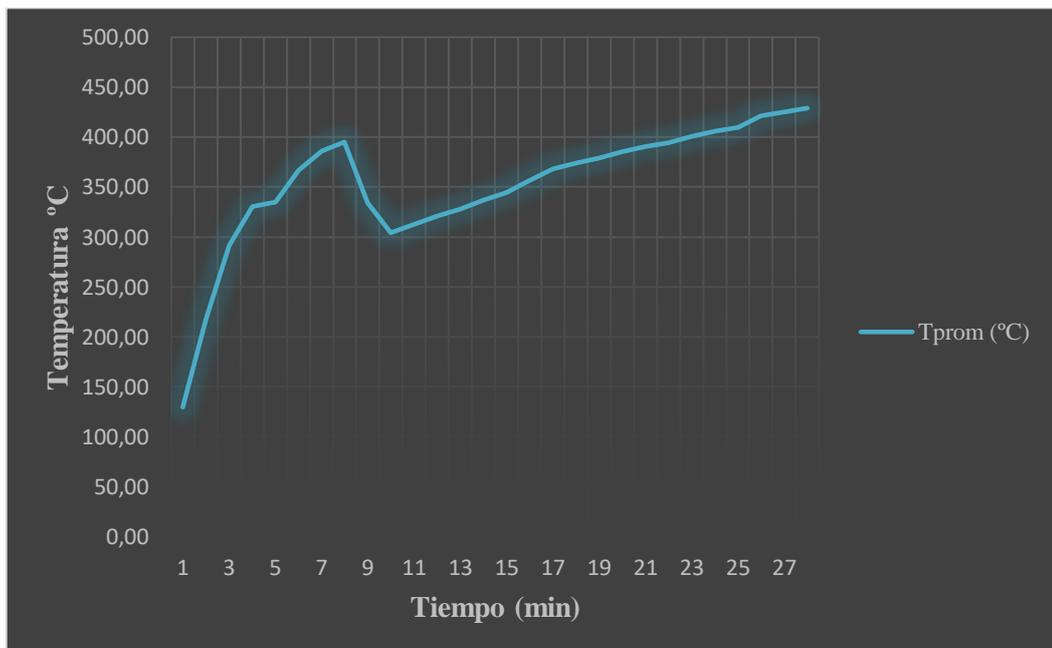


Figura 18. Temperatura promedio vs tiempo fundición Zn (arranque caliente). Elaborado por: Investigador

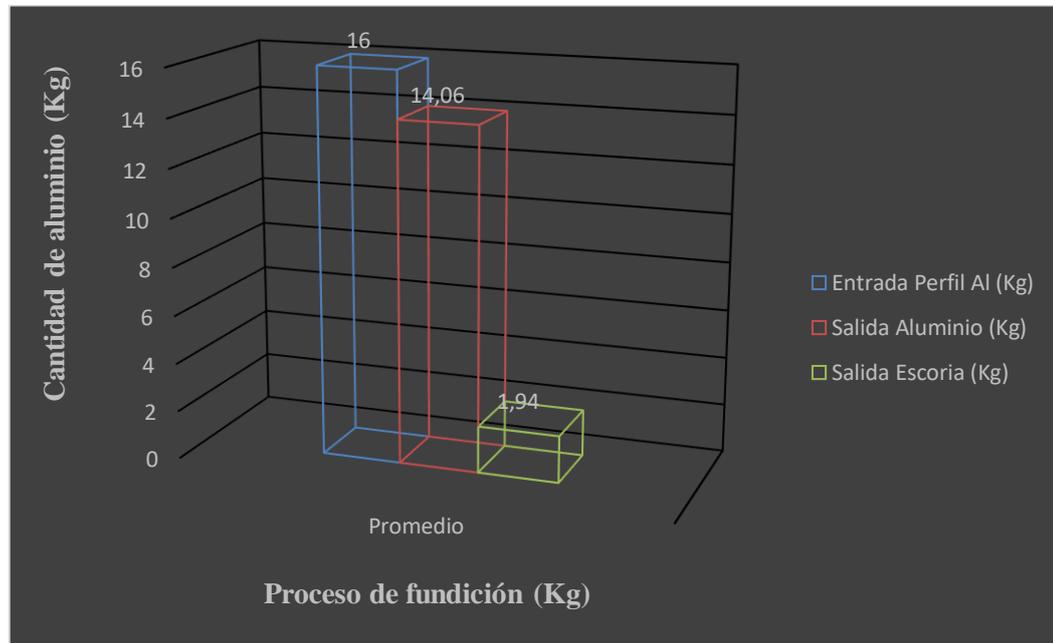
La tabla 15 muestra los datos de la cantidad de material empleado el proceso de fundición del aluminio.

**Tabla 15. Datos cantidad de aluminio en el proceso de fundición**

Categoría		Proceso 1	Proceso 2	Proceso 3	Promedio
<b>Entrada</b>	Perfil Al (Kg)	16	16	16	16
<b>Salida</b>	Aluminio (Kg)	14,08	14,2	13,9	14,06
	Escoria (Kg)	1,92	1,8	2,1	1,94

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

La figura 19 muestra la cantidad de aluminio empleado en el proceso de fundición.



**Figura 19. Cantidad de aluminio empleado en la fundición. Elaborado por: Investigador**

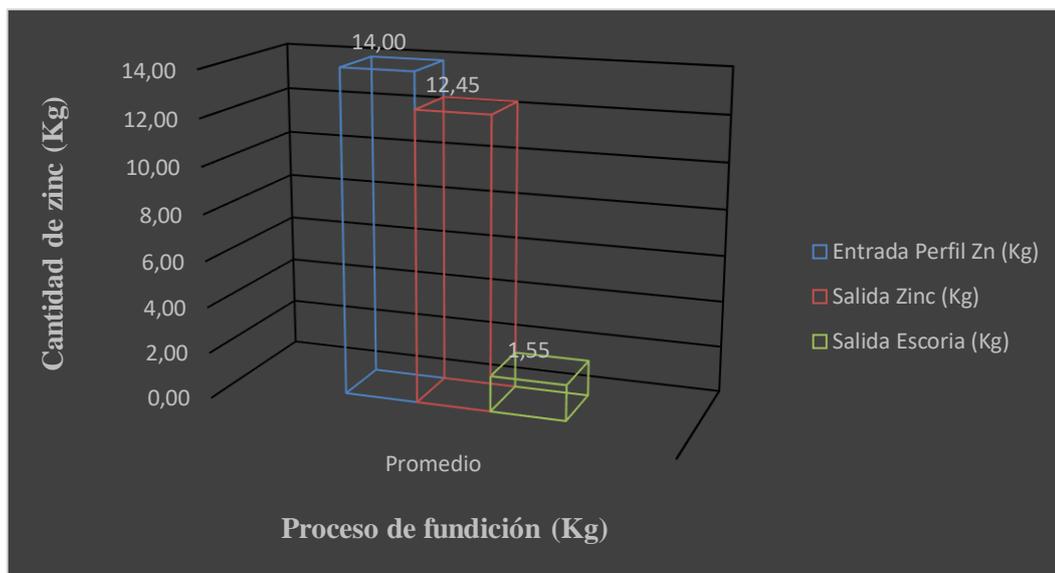
La tabla 16 muestra los datos de la cantidad de material empleado el proceso de fundición del zinc.

**Tabla 16. Datos cantidad de zinc en el proceso de fundición**

Categoría		Proceso 1	Proceso 2	Proceso 3	Promedio
<b>Entrada</b>	Perfil Zn (Kg)	14	14	14	14,00
<b>Salida</b>	Zinc (Kg)	12,36	12,49	12,51	12,45
	Escoria (Kg)	1,64	1,51	1,49	1,55

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

La figura 20 muestra la cantidad de zinc empleado en el proceso de fundición.



**Figura 20. Cantidad de zinc empleado en la fundición. Elaborado por:** Investigador

### 3.2. Validación técnica-económica de los resultados

En el proyecto de investigación para el diseño del simulador de horno de fundición de zinc y aluminio se utilizó el programa Matlab que permite mostrar la curva de temperatura versus tiempo al manipular la ecuación que comanda el proceso metalúrgico de estos metales muy importantes para la industria en la provincia de Cotopaxi. Además, se ha utilizado la herramienta GUIDE que es parte del Matlab, para diseñar una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) que permita crear un aplicativo sencillo e intuitivo para manipular y emular el proceso de fundición tanto del aluminio como del zinc. Adicional a este recurso de software se utilizó los siguientes recursos de hardware, talento humano e insumos tanto para el desarrollo del simulador como para su implementación.

La validación económica del diseño del simulador de fundición para el aluminio y zinc en el Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi matiza el uso de los recursos tecnológicos del entorno de desarrollo, así como la caracterización de los recursos de software y hardware, el recurso humano con el propósito de determinar el costo total de la solución. El rendimiento del proyecto, así como la cronología de las actividades que se ejecutan en cada proceso de diseño del simulador de horno de fundición, necesitan de los aspectos financieros para poder monitorear y controlar su cumplimiento, requiere analizar la parte administrativa y la financiera para poder sustentarlo.

### Recurso Humano:

Se considera como recurso primario al capital humano que interviene en cada una de las fases de la solución. La tabla 17 muestra el recurso humano que interviene en el diseño del horno simulador para el Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi y la toma de decisiones.

*Tabla 17. Recurso Humano*

CARGO	NOMBRE	SALARIO TOTAL (\$)
Tutor del proyecto	Ing. Edwin Homero Moreano, MgC.	0.000,00
Desarrollador	Miguel Alejandro Escobar	900,00
<b>TOTAL</b>	2 personas	<b>900,00</b>

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

### Caracterización del Hardware para el Desarrollo:

La caracterización del hardware para el desarrollo, se refiere al equipo que está disponible para el diseño del horno simulador para el proceso de fundición para las prácticas estudiantiles en el Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. La tabla 18 muestra la caracterización del hardware para el desarrollo.

*Tabla 18. Caracterización del Hardware para el desarrollo*

HARDWARE	CARACTERÍSTICAS
Computador portátil Dell Inspiron 1135	
Disco Duro	2 TB HDD
Memoria RAM	8 GB DDR3
Procesador	Intel® Core™ i5
Display	14.0" 16:9 HD LED LCD
Otros	Memoria Gráfica: Intel® HD Graphics DVD-Super Multi DL drive Protocolo: 802.11b/g/n Batería: 18-cell Li-ion
<b>PRECIO</b>	<b>\$ 780,00</b>

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

La tabla 19 muestra el hardware adicional para el desarrollo del simulador de horno de fundición del aluminio y zinc.

*Tabla 19. Hardware adicional para el desarrollo*

<b>HARDWARE ADICIONAL PARA EL DESARROLLO</b>	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>VALOR (\$)</b>
Impresora EPSON TX 1200NT	90,00
<b>TOTAL</b>	<b>90,00</b>

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

La tabla 20 muestra el costo total del hardware para el desarrollo del simulador de horno de fundición del aluminio y zinc.

*Tabla 20. Costo total del hardware para el desarrollo*

<b>COSTO TOTAL DEL HARDWARE PARA EL DESARROLLO</b>	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>COSTO TOTAL (\$)</b>
Hardware para el desarrollo	780,00
Hardware adicional para el desarrollo	90,00
<b>TOTAL</b>	<b>870,00</b>

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

### **Caracterización del Hardware para la Implantación:**

La tabla 21 muestra la caracterización del hardware para la implantación del simulador de horno de fundición del aluminio y zinc.

*Tabla 21. Caracterización del Hardware para la implantación*

<b>HARDWARE</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
Computador de escritorio HP TN5500s	
Disco Duro	1 TB HDD
Memoria RAM	2 GB DDR3
Procesador	Intel® Core™ i3
Monitor	17.0" 32:16 LCD
Otros	DVD-Super Multi DL drive Teclado, mouse, parlantes Protocolo: 802.11b/g/n
<b>PRECIO</b>	<b>\$ 670,00</b>

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

La tabla 22 muestra el hardware adicional para la implantación del simulador de horno de fundición del aluminio y zinc.

**Tabla 22. Hardware adicional para la implantación**

<b>HARDWARE ADICIONAL IMPLANTACIÓN</b>	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>VALOR (\$)</b>
Cable eléctrico de 2 pares 220V 1,5 A	40,00
Periféricos y almacenamiento	100,00
<b>TOTAL</b>	<b>140,00</b>

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

La tabla 23 muestra el costo total del hardware para la implantación del simulador de horno de fundición del aluminio y zinc.

**Tabla 23. Costo total del hardware para la implantación**

<b>COSTO TOTAL DEL HARDWARE PARA LA IMPLANTACIÓN</b>	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>COSTO TOTAL (\$)</b>
Hardware para la implantación	670,00
Hardware adicional implantación	140,00
<b>TOTAL</b>	<b>810,00</b>

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

### **Caracterización del Software para el Desarrollo:**

La tabla 24 muestra la caracterización del software para el desarrollo del simulador de horno de fundición del aluminio y zinc.

**Tabla 24. Caracterización del Software para el desarrollo**

<b>SOFTWARE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>VALOR (\$)</b>
Windows 10 Professional Win. 64	Sistema Operativo	180,00
MATLAB 2019a	Procesamiento matricial y matemático	VERSIÓN ESTUDIANTIL
Microsoft Office 2016: Word Visio Access	Procesamiento de texto. Diseño de gráficos de ingeniería.	60,00
<b>TOTAL</b>		<b>240,00</b>

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

El software utilizado para desarrollar el simulador de horno en su totalidad es MATLAB, junto con el componente GUIDE que permite el desarrollo de las GUI.

### **Caracterización del Software para la Implantación:**

La tabla 25 muestra la caracterización del software para la implantación del simulador de horno de fundición del aluminio y zinc.

**Tabla 25. Caracterización del Software para la implantación**

SOFTWARE	CARACTERÍSTICAS	VALOR (\$)
Windows 10 Win. 64 Professional	Sistema Operativo	180,00
Nullsoft Scriptable NSIS 3.0	Herramienta de creación de instaladores	FREE
<b>TOTAL</b>		<b>180,00</b>

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

### **Capacitación del Recurso Humano:**

La tabla 26 muestra la capacitación del recurso humano inherente al diseño del simulador de horno de fundición del aluminio y zinc.

**Tabla 26. Capacitación del Recurso Humano**

RECURSO	DESCRIPCIÓN	DURACIÓN	TEMAS	VALOR (\$)
1	Capacitación para procesos metalúrgicos	40 horas	- Fundición del aluminio y zinc - Proyectos tecnológicos	500,00
2	Capacitación para programación en MATLAB	40 horas	- Solución de ecuaciones - Diseño de interfaces GUIDE	600,00
<b>TOTAL</b>				<b>1.100,00</b>

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

Para el diseño del simulador de horno de fundición del zinc y aluminio para las prácticas de los estudiantes del Instituto Tecnológico Superior Cotopaxi, se necesita dar capacitación al Capital Humano ya que al ser un proyecto de innovación tecnológica requiere de competitividad y horas de experiencia en ámbitos técnicos como la programación de MATLAB y procesos metalúrgicos. La capacitación del capital humano es muy importante para el desarrollo del prototipo.

### **Costo del diseño del simulador de horno de fundición:**

El presupuesto contempla el coste total del diseño del simulador de horno de fundición del zinc y aluminio así como un desglose de los conceptos económicos. Para el diseño de la GUI e interfaces se ha tenido que realizar un estudio previo de

algoritmos bosquejo antes de llegar a los modelos definitivos. La tabla 27 muestra el costo del diseño del simulador de horno de fundición del zinc y aluminio en aristas como el modelo matemático y las interfaces.

*Tabla 27. Costo del diseño del simulador*

DESCRIPCIÓN	VALOR (\$)
Líneas de Códigos (LCD)	690,00
Pago de sueldo del Desarrollador por 2 meses	1.200,00
Depreciaciones de los equipos (30% anual)	43,50
Depreciación por utilización de las licencias del software	13,75
<b>TOTAL</b>	<b>1.947,25</b>

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

#### **Costo total del diseño del simulador de horno de fundición:**

La tabla 28 muestra el costo total del diseño del simulador de horno de fundición del zinc y aluminio en el Instituto Tecnológico Superior Cotopaxi.

*Tabla 28. Costo total del diseño del simulador*

DESCRIPCIÓN	VALOR (\$)
Costo del diseño del simulador	1.947,25
Software para la implantación	180,00
Hardware para la implantación	810,00
Capacitación del Capital Humano	1.100,00
Mobiliario	70,00
Imprevistos (10%)	410,72
<b>TOTAL GENERAL</b>	<b>4.517,97</b>

*Fuente: Investigación. Elaborado por: Elaboración propia*

El presupuesto total del diseño del simulador de horno de fundición del zinc y aluminio asciende a la cantidad de **CUATRO MIL QUINIENTOS DIECISIETE 97/100 DÓLARES**. Dinero financiado por el desarrollador del proyecto y patrocinado por el Instituto Tecnológico Superior Cotopaxi. Es necesario destacar que la inversión en el proyecto tecnológico ayudará a mejorar la capacidad técnica y de laboratorio principalmente de la carrera de Electromecánica.

### 3.3. Evaluación de expertos

Para la evaluación de expertos se aplicó un instrumento compuesto de interrogantes que examinan tres aspectos fundamentales del simulador de horno de fundición, como son: la calidad general del entorno, la calidad técnica de diseño, así como la calidad técnica del modelo; dicho instrumento se aplicó a cinco profesionales en el área de la Electromecánica, Mecánica y Metalurgia del Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi:

#### INSTRUCCIONES:

Para poder contestar las interrogantes es importante que preste atención a cada ítem:

- El **Objetivo** de este instrumento es conocer la calidad del simulador de horno de fundición de aluminio y zinc diseñado en MATLAB.

#### Instrucciones para contestar el instrumento:

- Comience completando los datos personales, señale con una “x” la opción que corresponda en su caso.

Cada una de las afirmaciones, tabla 29 del cuestionario describe las características óptimas del simulador sobre MATLAB. Marque con una “x” la casilla correspondiente según la frecuencia o intensidad con la que se cumple esa afirmación en el software. Responda de acuerdo con la siguiente escala:

1: Nada	2: Muy poco	3: Algo	4: Bastante	5: Mucho
---------	-------------	---------	-------------	----------

Es necesario responder todos los ítems. No existen respuestas verdaderas o falsas. Puede realizar los comentarios que considere oportunos a las cuestiones planteadas. El instrumento de validación permitirá cualificar el modelamiento y simulación del horno de fundición del aluminio y zinc.

*Tabla 29. Formato de validación del simulador de horno*

I.- DATOS PERSONALES Y PROFESIONALES		
SIMULADOR HORNO DE FUNDICIÓN ALUMINIO-ZINC		
Usuario:	Docente	
	Título técnico	

	Usuario	
<b>Sexo:</b>	Hombre	
	Mujer	
<b>Estado civil:</b>	Soltero/a	
	Casado/a	
	Divorciado/a	
<b>Formación Académica:</b>	Máster	
	Ingeniero	
	Licenciado	
<b>Años experiencia:</b>	> 5 años	
	> 3 años	
	> 1 año	

### CUESTIONARIO DE VALIDACIÓN DEL SIMULADOR:

<b>II. CUESTIONARIO</b>					
<b>CALIDAD GENERAL DEL ENTORNO</b>	5	4	3	2	1
El simulador de horno ofrece un conocimiento teórico-práctico con posibilidades de aplicación directa a la realidad					
El simulador de horno es atractivo, intuitivo y de fácil operatividad					
El simulador de horno presenta una combinación equitativa de texto/colores y transmite credibilidad					
El simulador de horno permite modelar el proceso de fundición del aluminio y el zinc					
La metodología utilizada en el simulador de horno y la plataforma MATLAB, atienden los cálculos matemáticos en la fundición					
El uso de la plataforma MATLAB, en el simulador de horno, presenta calidad informática (algoritmos, interfaz, funciones, etc.)					
<b>CALIDAD TÉCNICA DEL DISEÑO</b>	5	4	3	2	1
La plataforma MATLAB y el simulador de horno ofrecen una interfaz GUIDE para navegación					
La navegación en el simulador de horno GUIDE es sencillo, facilita la interactividad y uso de los componentes					
Los encabezados y títulos, presentados en el simulador de horno, en la interfaz es detallado y explícito					
El tamaño de los iconos y botones, en el simulador de horno es adecuado de diseño coherente con la funcionalidad					
El diseño del simulador de horno se caracteriza por presentar una apariencia visual afable, equilibrada (interfaz-texto, calidad-tamaño de componentes)					
<b>CALIDAD TÉCNICA DEL MODELO</b>	5	4	3	2	1

El simulador de horno presenta un modelado matemático de forma integrada y combinando el proceso de fundición del aluminio y zinc					
Los recursos de modelado matemático presentados en el simulador de horno (algoritmos, funciones) disponen de etiquetas.					
El simulador de horno fomenta contenidos matemáticos acordes a la fundición del aluminio y zinc, considera el residuo o escoria					
La legibilidad del simulador de horno en MATLAB se caracteriza por un error o tolerancia inferior al 15%					
El simulador de horno muestra los resultados de interés (temperatura, tiempo, escoria) adecuados a las características del modelado matemático y los usuarios de interés					
<b>SUGERENCIAS PARA MEJORAR EL SIMULADOR HORNO DE FUNDICIÓN</b>					
Indicaciones para mejorar la eficiencia del entorno y el método utilizado:					
Indicaciones de mejora de la calidad técnica del diseño del simulador:					
Indicaciones de mejora de la calidad técnica del modelo del simulador:					
Otros comentarios:					

*Fuente: Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. Elaborado por: Elaboración propia*

A partir del modelo de validación del simulador de horno de fundición en MATLAB, se aplica la validación del instrumento a los expertos, tabla 30.

**Tabla 30. Validación uno del simulador horno de fundición**

<b>I.- DATOS PERSONALES Y PROFESIONALES</b>		
<b>SIMULADOR HORNO DE FUNDICIÓN ALUMINIO-ZINC</b>		
<b>NOMBRE:</b> <i>Mario Rolando García Rocha</i>		
<b>Usuario:</b>	Docente	<i>x</i>
	Título técnico	<i>x</i>
	Usuario	<i>x</i>
<b>Sexo:</b>	Hombre	<i>x</i>
	Mujer	----
<b>Estado civil:</b>	Soltero/a	----
	Casado/a	<i>x</i>
	Divorciado/a	----
<b>Formación Académica:</b>	Máster	<i>x</i>

	Ingeniero	x
	Licenciado	----
<b>Años experiencia:</b>	> 5 años	x
	> 3 años	----
	> 1 año	----

**CUESTIONARIO DE VALIDACIÓN DEL SIMULADOR:**

<b>II. CUESTIONARIO</b>					
<b>CALIDAD GENERAL DEL ENTORNO</b>	5	4	3	2	1
El simulador de horno ofrece un conocimiento teórico-práctico con posibilidades de aplicación directa a la realidad	x				
El simulador de horno es atractivo, intuitivo y de fácil operatividad			x		
El simulador de horno presenta una combinación equitativa de texto/colores y transmite credibilidad		x			
El simulador de horno permite modelar el proceso de fundición del aluminio y el zinc	x				
La metodología utilizada en el simulador de horno y la plataforma MATLAB, atienden los cálculos matemáticos en la fundición	x				
El uso de la plataforma MATLAB, en el simulador de horno, presenta calidad informática (algoritmos, interfaz, funciones, etc.)		x			
<b>CALIDAD TÉCNICA DEL DISEÑO</b>	5	4	3	2	1
La plataforma MATLAB y el simulador de horno ofrecen una interfaz GUIDE para navegación		x			
La navegación en el simulador de horno GUIDE es sencillo, facilita la interactividad y uso de los componentes	x				
Los encabezados y títulos, presentados en el simulador de horno, en la interfaz es detallado y explícito	x				
El tamaño de los iconos y botones, en el simulador de horno es adecuado de diseño coherente con la funcionalidad	x				
El diseño del simulador de horno se caracteriza por presentar una apariencia visual afable, equilibrada (interfaz-texto, calidad-tamaño de componentes)		x			
<b>CALIDAD TÉCNICA DEL MODELO</b>	5	4	3	2	1
El simulador de horno presenta un modelado matemático de forma integrada y combinando el proceso de fundición del aluminio y zinc		x			
Los recursos de modelado matemático presentados en el simulador de horno (algoritmos, funciones) disponen de etiquetas.		x			

El simulador de horno fomenta contenidos matemáticos acordes a la fundición del aluminio y zinc, considera el residuo o escoria	x				
La legibilidad del simulador de horno en MATLAB se caracteriza por un error o tolerancia inferior al 15%		x			
El simulador de horno muestra los resultados de interés (temperatura, tiempo, escoria) adecuados a las características del modelado matemático y los usuarios de interés		x			
<b>SUGERENCIAS PARA MEJORAR EL SIMULADOR HORNO DE FUNDICIÓN</b>					
Indicaciones para mejorar la eficiencia del entorno y el método utilizado: <i>Incorporar un botón o interfaz de ayuda en el horno simulador</i>					
Indicaciones de mejora de la calidad técnica del diseño del simulador: <i>Ninguna</i>					
Indicaciones de mejora de la calidad técnica del modelo del simulador: <i>Ninguna</i>					
Otros comentarios: <i>Excelente diseño de un simulador de horno de fundición</i>					

**Fuente:** Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. **Elaborado por:** Elaboración propia

La tabla 31 muestra la validación del simulador de horno de fundición en MATLAB a un docente de la carrera de Electromecánica, asignatura Máquinas Eléctricas que frecuentemente utilizan en laboratorio aplicativos como MATLAB para la simulación de ecuaciones concernientes a máquinas síncronas y asíncronas.

**Tabla 31. Validación del simulador horno de fundición**

<b>I.- DATOS PERSONALES Y PROFESIONALES</b>		
<b>SIMULADOR HORNO DE FUNDICIÓN ALUMINIO-ZINC</b>		
<b>NOMBRE:</b> <i>Ricardo Alberto Cadena Velasco</i>		
<b>Usuario:</b>	Docente	x
	Título técnico	x
	Usuario	x
<b>Sexo:</b>	Hombre	x
	Mujer	----
<b>Estado civil:</b>	Soltero/a	----
	Casado/a	x
	Divorciado/a	----
<b>Formación Académica:</b>	Máster	x
	Ingeniero/a	x
	Licenciado	----
<b>Años experiencia:</b>	> 5 años	----
	> 3 años	x
	> 1 año	----

## CUESTIONARIO DE VALIDACIÓN DEL SIMULADOR:

II. CUESTIONARIO					
<b>CALIDAD GENERAL DEL ENTORNO</b>	5	4	3	2	1
El simulador de horno ofrece un conocimiento teórico-práctico con posibilidades de aplicación directa a la realidad	x				
El simulador de horno es atractivo, intuitivo y de fácil operatividad	x				
El simulador de horno presenta una combinación equitativa de texto/colores y transmite credibilidad	x				
El simulador de horno permite modelar el proceso de fundición del aluminio y el zinc	x				
La metodología utilizada en el simulador de horno y la plataforma MATLAB, atienden los cálculos matemáticos en la fundición		x			
El uso de la plataforma MATLAB, en el simulador de horno, presenta calidad informática (algoritmos, interfaz, funciones, etc.)		x			
<b>CALIDAD TÉCNICA DEL DISEÑO</b>	5	4	3	2	1
La plataforma MATLAB y el simulador de horno ofrecen una interfaz GUIDE para navegación	x				
La navegación en el simulador de horno GUIDE es sencillo, facilita la interactividad y uso de los componentes		x			
Los encabezados y títulos, presentados en el simulador de horno, en la interfaz es detallado y explícito		x			
El tamaño de los iconos y botones, en el simulador de horno es adecuado de diseño coherente con la funcionalidad	x				
El diseño del simulador de horno se caracteriza por presentar una apariencia visual afable, equilibrada (interfaz-texto, calidad-tamaño de componentes)		x			
<b>CALIDAD TÉCNICA DEL MODELO</b>	5	4	3	2	1
El simulador de horno presenta un modelado matemático de forma integrada y combinando el proceso de fundición del aluminio y zinc			x		
Los recursos de modelado matemático presentados en el simulador de horno (algoritmos, funciones) disponen de etiquetas.	x				
El simulador de horno fomenta contenidos matemáticos acordes a la fundición del aluminio y zinc, considera el residuo o escoria	x				
La legibilidad del simulador de horno en MATLAB se caracteriza por un error o tolerancia inferior al 15%	x				
El simulador de horno muestra los resultados de interés (temperatura, tiempo, escoria) adecuados a las características del modelado matemático y los usuarios de interés		x			
<b>SUGERENCIAS PARA MEJORAR EL SIMULADOR HORNO DE FUNDICIÓN</b>					
Indicaciones para mejorar la eficiencia del entorno y el método utilizado: <i>Emplear una interfaz de portada, para ingresar al simulador</i>					

Sugerencias de mejora de la calidad técnica del diseño del simulador: <i>Ninguna</i>
Indicaciones de mejora de la calidad técnica del modelo del simulador: <i>Ninguna</i>
Otros comentarios: <i>Aumentar si fuese posible la fundición de otros metales</i>

*Fuente: Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. Elaborado por: Elaboración propia*

La tabla 32 muestra la validación del simulador de horno de fundición en MATLAB con otro profesional de Electromecánica, materia Tecnología de Materiales.

**Tabla 32. Validación tres del simulador horno de fundición**

<b>I.- DATOS PERSONALES Y PROFESIONALES</b>		
<b>SIMULADOR HORNO DE FUNDICIÓN ALUMINIO-ZINC</b>		
<b>NOMBRE:</b> <i>Daniel Darío Chicaiza del Valle</i>		
<b>Usuario:</b>	Docente	<i>x</i>
	Título técnico	<i>x</i>
	Usuario	<i>x</i>
<b>Sexo:</b>	Hombre	<i>x</i>
	Mujer	----
<b>Estado civil:</b>	Soltero/a	----
	Casado/a	<i>x</i>
	Divorciado/a	----
<b>Formación Académica:</b>	Máster	<i>x</i>
	Ingeniero/a	<i>x</i>
	Licenciado/a	----
<b>Años experiencia:</b>	> 5 años	<i>x</i>
	> 3 años	----
	> 1 año	----

### **CUESTIONARIO DE VALIDACIÓN DEL SIMULADOR:**

<b>II. CUESTIONARIO</b>					
<b>CALIDAD GENERAL DEL ENTORNO</b>	5	4	3	2	1
El simulador de horno ofrece un conocimiento teórico-práctico con posibilidades de aplicación directa a la realidad	<i>x</i>				
El simulador de horno es atractivo, intuitivo y de fácil operatividad	<i>x</i>				
El simulador de horno presenta una combinación equitativa de texto/colores y transmite credibilidad		<i>x</i>			

El simulador de horno permite modelar el proceso de fundición del aluminio y el zinc	x				
La metodología utilizada en el simulador de horno y la plataforma MATLAB, atienden los cálculos matemáticos en la fundición		x			
El uso de la plataforma MATLAB, en el simulador de horno, presenta calidad informática (algoritmos, interfaz, funciones, etc.)		x			
<b>CALIDAD TÉCNICA DEL DISEÑO</b>	5	4	3	2	1
La plataforma MATLAB y el simulador de horno ofrecen una interfaz GUIDE para navegación	x				
La navegación en el simulador de horno GUIDE es sencillo, facilita la interactividad y uso de los componentes	x				
Los encabezados y títulos, presentados en el simulador de horno, en la interfaz es detallado y explícito		x			
El tamaño de los iconos y botones, en el simulador de horno es adecuado de diseño coherente con la funcionalidad	x				
El diseño del simulador de horno se caracteriza por presentar una apariencia visual afable, equilibrada (interfaz-texto, calidad-tamaño de componentes)	x				
<b>CALIDAD TÉCNICA DEL MODELO</b>	5	4	3	2	1
El simulador de horno presenta un modelado matemático de forma integrada y combinando el proceso de fundición del aluminio y zinc	x				
Los recursos de modelado matemático presentados en el simulador de horno (algoritmos, funciones) disponen de etiquetas.	x				
El simulador de horno fomenta contenidos matemáticos acordes a la fundición del aluminio y zinc, considera el residuo o escoria	x				
La legibilidad del simulador de horno en MATLAB se caracteriza por un error o tolerancia inferior al 15%		x			
El simulador de horno muestra los resultados de interés (temperatura, tiempo, escoria) adecuados a las características del modelado matemático y los usuarios de interés	x				
<b>SUGERENCIAS PARA MEJORAR EL SIMULADOR HORNO DE FUNDICIÓN</b>					
Indicaciones para mejorar la eficiencia del entorno y el método utilizado: <i>Incorporar otras interfaces informativas y/o portada</i>					
Indicaciones de mejora de la calidad técnica del diseño del simulador: <i>Sería bueno dos interfaces distintas Aluminio y Zinc</i>					
Indicaciones de mejora de la calidad técnica del modelo del simulador: <i>Incorporar, si hay la posibilidad métodos de visión artificial</i>					
Otros comentarios: <i>Es importante incorporar alguna interfaz de guía en el horno</i>					

**Fuente:** Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. **Elaborado por:** Elaboración propia

La tabla 33 muestra los resultados de la validación a otro profesional del área de Electromecánica y la asignatura de Resistencia de Materiales.

**Tabla 33. Validación cuatro del simulador horno de fundición**

<b>I.- DATOS PERSONALES Y PROFESIONALES</b>		
SIMULADOR HORNO DE FUNDICIÓN ALUMINIO-ZINC		
NOMBRE: <i>Juan Francisco Palate Vaca</i>		
Usuario:	Docente	<i>x</i>
	Título técnico	----
	Usuario	<i>x</i>
Sexo:	Hombre	<i>x</i>
	Mujer	----
Estado civil:	Soltero/a	----
	Casado/a	<i>x</i>
	Divorciado/a	----
Formación Académica:	Máster	<i>x</i>
	Ingeniero/a	----
	Licenciado/a	<i>x</i>
Años experiencia:	> 5 años	----
	> 3 años	----
	> 1 año	<i>x</i>

**CUESTIONARIO DE VALIDACIÓN DEL SIMULADOR:**

<b>II. CUESTIONARIO</b>					
CALIDAD GENERAL DEL ENTORNO	5	4	3	2	1
El simulador de horno ofrece un conocimiento teórico-práctico con posibilidades de aplicación directa a la realidad	<i>x</i>				
El simulador de horno es atractivo, intuitivo y de fácil operatividad	<i>x</i>				
El simulador de horno presenta una combinación equitativa de texto/colores y transmite credibilidad	<i>x</i>				
El simulador de horno permite modelar el proceso de fundición del aluminio y el zinc	<i>x</i>				
La metodología utilizada en el simulador de horno y la plataforma MATLAB, atienden los cálculos matemáticos en la fundición		<i>x</i>			
El uso de la plataforma MATLAB, en el simulador de horno, presenta calidad informática (algoritmos, interfaz, funciones, etc.)		<i>x</i>			
CALIDAD TÉCNICA DEL DISEÑO	5	4	3	2	1
La plataforma MATLAB y el simulador de horno ofrecen una interfaz GUIDE para navegación	<i>x</i>				
La navegación en el simulador de horno GUIDE es sencillo, facilita la interactividad y uso de los componentes		<i>x</i>			

Los encabezados y títulos, presentados en el simulador de horno, en la interfaz es detallado y explícito		x			
El tamaño de los iconos y botones, en el simulador de horno es adecuado de diseño coherente con la funcionalidad		x			
El diseño del simulador de horno se caracteriza por presentar una apariencia visual afable, equilibrada (interfaz-texto, calidad-tamaño de componentes)	x				
<b>CALIDAD TÉCNICA DEL MODELO</b>	5	4	3	2	1
El simulador de horno presenta un modelado matemático de forma integrada y combinando el proceso de fundición del aluminio y zinc	x				
Los recursos de modelado matemático presentados en el simulador de horno (algoritmos, funciones) disponen de etiquetas.	x				
El simulador de horno fomenta contenidos matemáticos acordes a la fundición del aluminio y zinc, considera el residuo o escoria	x				
La legibilidad del simulador de horno en MATLAB se caracteriza por un error o tolerancia inferior al 15%		x			
El simulador de horno muestra los resultados de interés (temperatura, tiempo, escoria) adecuados a las características del modelado matemático y los usuarios de interés	x				
<b>SUGERENCIAS PARA MEJORAR EL SIMULADOR HORNO DE FUNDICIÓN</b>					
Indicaciones para mejorar la eficiencia del entorno y el método utilizado: <i>Ninguna</i>					
Indicaciones de mejora de la calidad técnica del diseño del simulador: <i>Incorporar una interfaz de portada para el simulador</i>					
Indicaciones de mejora de la calidad técnica del modelo del simulador: <i>Ninguna</i>					
Otros comentarios: <i>Un simulador de horno de fundición muy correcto para las prácticas técnicas de metalurgia</i>					

**Fuente:** Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. **Elaborado por:** Elaboración propia

La tabla 34 muestra otra validación profesional del simulador de horno de fundición en MATLAB, especialista involucrado en el área de Electromecánica, materia Mantenimiento Electromecánico.

**Tabla 34. Validación cinco del simulador horno de fundición**

<b>I.- DATOS PERSONALES Y PROFESIONALES</b>		
SIMULADOR HORNO DE FUNDICIÓN ALUMINIO-ZINC		
<b>NOMBRE:</b> <i>Gabriel Alexander Pacas Catota</i>		
<b>Usuario:</b>	Docente	----
	Título técnico	x
	Usuario	x
<b>Sexo:</b>	Hombre	x

	Mujer	----
<b>Estado civil:</b>	Soltero/a	✗
	Casado/a	----
	Divorciado/a	----
	Máster	✗
<b>Formación Académica:</b>	Ingeniero/a	✗
	Licenciado/a	----
	> 5 años	----
<b>Años experiencia:</b>	> 3 años	✗
	> 1 año	----

### CUESTIONARIO DE VALIDACIÓN DEL SIMULADOR:

<b>II. CUESTIONARIO</b>					
<b>CALIDAD GENERAL DEL ENTORNO</b>	5	4	3	2	1
El simulador de horno ofrece un conocimiento teórico-práctico con posibilidades de aplicación directa a la realidad	✗				
El simulador de horno es atractivo, intuitivo y de fácil operatividad	✗				
El simulador de horno presenta una combinación equitativa de texto/colores y transmite credibilidad	✗				
El simulador de horno permite modelar el proceso de fundición del aluminio y el zinc	✗				
La metodología utilizada en el simulador de horno y la plataforma MATLAB, atienden los cálculos matemáticos en la fundición	✗				
El uso de la plataforma MATLAB, en el simulador de horno, presenta calidad informática (algoritmos, interfaz, funciones, etc.)	✗				
<b>CALIDAD TÉCNICA DEL DISEÑO</b>	5	4	3	2	1
La plataforma MATLAB y el simulador de horno ofrecen una interfaz GUIDE para navegación		✗			
La navegación en el simulador de horno GUIDE es sencillo, facilita la interactividad y uso de los componentes			✗		
Los encabezados y títulos, presentados en el simulador de horno, en la interfaz es detallado y explícito	✗				
El tamaño de los iconos y botones, en el simulador de horno es adecuado de diseño coherente con la funcionalidad	✗				
El diseño del simulador de horno se caracteriza por presentar una apariencia visual afable, equilibrada (interfaz-texto, calidad-tamaño de componentes)	✗				
<b>CALIDAD TÉCNICA DEL MODELO</b>	5	4	3	2	1
El simulador de horno presenta un modelado matemático de forma integrada y combinando el proceso de fundición del aluminio y zinc	✗				

Los recursos de modelado matemático presentados en el simulador de horno (algoritmos, funciones) disponen de etiquetas.		x			
El simulador de horno fomenta contenidos matemáticos acordes a la fundición del aluminio y zinc, considera el residuo o escoria	x				
La legibilidad del simulador de horno en MATLAB se caracteriza por un error o tolerancia inferior al 15%	x				
El simulador de horno muestra los resultados de interés (temperatura, tiempo, escoria) adecuados a las características del modelado matemático y los usuarios de interés	x				
<b>SUGERENCIAS PARA MEJORAR EL SIMULADOR HORNO DE FUNDICIÓN</b>					
Indicaciones para mejorar la eficiencia del entorno y el método utilizado: <i>Ninguna</i>					
Indicaciones de mejora de la calidad técnica del diseño del simulador: <i>Crear una interfaz de soporte o ayuda del simulador</i>					
Indicaciones de mejora de la calidad técnica del modelo del simulador: <i>Ninguna</i>					
Otros comentarios: <i>Utilizar el simulador de horno de fundición para prácticas de laboratorio, incorporando más metales de fundición.</i>					

**Fuente:** Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. **Elaborado por:** Elaboración propia

Lo profesionales expertos que evaluaron el simulador de horno de fundición en MATLAB enfatizan las condiciones valederas y positivas que tiene la aplicación, además propician condiciones favorables para su implementación en la institución educativa, a sabiendas de que la tecnología ya es parte de la educación sobre todo en proceso prácticos como la fundición del aluminio y el zinc, que pueden ser tratados desde modelados matemáticos y simulaciones. Existen pequeñas sugerencias que pueden ser acotadas en la versión dos del prototipo.

### 3.4. Evaluación de usuarios

Tanto los docentes como los estudiantes se convierten en usuarios del simulador del proceso de fundición del zinc y aluminio, es importante una evaluación de estos dos participantes indispensables del proyecto de investigación, en primera instancia se examinará a los docentes. Los educadores han experimentado el simulador de horno de fundición del zinc y aluminio. Esta actividad práctica será ideal para mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje en actividades de la carrera de

Electromecánica, o si requieren de alguna mejoría o un cambio relativo a la plataforma MATLAB y su integración en el currículo.

Los algoritmos diseñados en MATLAB para la construcción del GUI de horno de fundición del zinc y aluminio, sirve a los docentes para reproducir en sus colegas el uso de MATLAB y otras plataformas de modelado y simulación matemática como estrategia metodológica, didáctica y pedagógica. De esta forma, con el propósito de determinar el nivel de satisfacción de los usuarios sobre el simulador del proceso de fundición del zinc y también del aluminio en una GUI diseñada en el GUIDE de MATLAB para estudiantes de la carrera de Electromecánica del Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi; se solicita tener en cuenta la siguiente escala establecida para su valoración.

1: Totalmente insatisfactorio	2: Nada satisfactorio	3: No estoy seguro	4: Satisfactorio	5: Muy satisfactorio
-------------------------------	-----------------------	--------------------	------------------	----------------------

La tabla 35 muestra la evaluación de los usuarios-docentes sobre el simulador del proceso de fundición del zinc y aluminio.

**Tabla 35. Evaluación de los usuarios-docentes**

NIVEL DE EVALUACIÓN DE LOS USUARIOS - DOCENTES						
P.	DESCRIPCIÓN	PUNTAJE				
1.	El simulador horno de fundición de aluminio-zinc está enfocada en las condiciones geométricas del material	1	2	3	4	5
2.	La información que brinda el simulador horno de fundición de aluminio-zinc es confiable.	1	2	3	4	5
3.	El simulador horno de fundición de aluminio-zinc presenta errores continuamente mientras se manipula.	1	2	3	4	5
4.	La búsqueda y navegación de un elemento del simulador horno de fundición de aluminio-zinc es sencillo e intuitivo	1	2	3	4	5
5.	Existe coherencia en el uso de elementos GUIDE en el simulador horno de fundición de aluminio-zinc.	1	2	3	4	5
6.	En general me encuentro satisfecho con el simulador horno de fundición de aluminio-zinc y MATLAB.	1	2	3	4	5

7.	El simulador horno de fundición de aluminio-zinc asume un modelo de docencia con característica reflexiva, crítica e innovadora.	1	2	3	4	5
8.	El simulador horno de fundición de aluminio-zinc promueve el aprendizaje del proceso metalúrgico	1	2	3	4	5
9.	El simulador horno de fundición de aluminio-zinc aporta a la eficiencia del proceso de fundición de estos metales	1	2	3	4	5
10.	El simulador horno de fundición de aluminio-zinc permite la personalización del proceso de fundición de estos metales con la metodología de casos prácticos	1	2	3	4	5

*Fuente: Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. Elaborado por: Elaboración propia*

De la evaluación del usuario-docente, se obtuvo los siguientes resultados según lo muestra la tabla 36. Estos resultados enfatizan el uso del simulador horno de fundición de aluminio-zinc con el uso de MATLAB; se cuantificarán a partir del criterio de los docentes, por medio de un puntaje asociativo al criterio de su experiencia.

**Tabla 36. Resultados de la evaluación de los usuarios-docentes**

USUARIO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	PUNTAJE	% PARCIAL
1	4	3	5	2	4	3	4	4	3	3	35	70
2	4	4	5	5	4	2	3	5	2	4	38	76
3	3	5	4	4	3	3	4	5	4	5	40	80
4	5	4	5	4	4	4	5	4	3	5	43	86
5	2	3	4	5	5	1	2	4	2	4	32	64
6	4	4	4	5	3	3	3	3	5	4	38	76
7	5	3	4	4	4	5	4	4	2	5	40	80
<b>TOTAL</b>											266	76

*Fuente: Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. Elaborado por: Elaboración propia*

Como se puede apreciar en la tabla anterior, más de la mitad de los docentes aprueban y se sienten satisfechos por la utilidad del simulador horno de fundición de aluminio-zinc para la concepción matemática y práctica del proceso de fundición de estos metales en los estudiantes de la carrera de Electromecánica del Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. De un total de 350 puntos disputados en la evaluación de usuario, se han obtenido un puntaje de 266 puntos, consiguiendo que el 76% de los usuarios-educadores están entusiasmados por el uso del simulador

horno de fundición de aluminio-zinc. Es satisfactorio cualificar el resultado del simulador horno de fundición de aluminio-zinc en una referencia positiva a la formación de estos procesos metalúrgicos con el uso de la tecnología, para propiciar el desarrollo de esta industria desde los pilares académicos.

En el mismo sentido, se presenta a continuación la evaluación de usuarios-estudiantes pero con diferentes interrogantes en el cuestionario del instrumento. La tabla 37 muestra la evaluación de los usuarios-estudiantes.

**Tabla 37. Evaluación de los usuarios-estudiantes**

NIVEL DE EVALUACIÓN DE LOS USUARIOS - ESTUDIANTES						
P.	DESCRIPCIÓN	PUNTAJE				
1.	El simulador horno de fundición de aluminio-zinc tiene contenido que ayudan en tú formación técnica de materiales	1	2	3	4	5
2.	La información que experimentas en el simulador horno de fundición de aluminio-zinc ayuda aprender el proceso metalúrgico de estos metales	1	2	3	4	5
3.	El simulador horno de fundición de aluminio-zinc presenta errores continuamente mientras se lo manipula	1	2	3	4	5
4.	La navegación de los componentes del GUI en el simulador horno de fundición de aluminio-zinc es sencillo puedes visualizarlo y comprenderlo	1	2	3	4	5
5.	Existe coherencia en el diseño del simulador horno de fundición de aluminio-zinc para su práctica en los procesos metalúrgicos de estos metales	1	2	3	4	5
6.	En general estas conforme con el uso del simulador horno de fundición de aluminio-zinc.	1	2	3	4	5
7.	El simulador horno de fundición de aluminio-zinc te ayuda a resolver problemas en la práctica de fundición de estos metales en hornos de tipo resistencia	1	2	3	4	5
8.	El simulador horno de fundición de aluminio-zinc promueve la eficiencia en la temperatura y tiempo de trabajo para el proceso de fundición de estos metales.	1	2	3	4	5
9.	El simulador horno de fundición de aluminio-zinc te ayuda a mejorar la prácticas metalúrgicas, ahorrar recursos y consolidar procesos de calidad	1	2	3	4	5
10.	El simulador horno de fundición de aluminio-zinc te brinda mucho interés en la fundición de metales porque puedes utilizar la tecnología para mejorar tu formación y con ello las buenas prácticas industriales en la metalurgia de la provincia de Cotopaxi.	1	2	3	4	5

**Fuente:** Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. **Elaborado por:** Elaboración propia

De la evaluación del usuario-estudiante, se obtuvo los siguientes resultados según lo muestra la tabla 38. Estos resultados enfatizan el uso del simulador horno de fundición de aluminio-zinc; se cuantificarán a partir del criterio de los estudiantes de Electromecánica, por medio de un puntaje al criterio en el uso del simulador del proceso metalúrgico para metales como el zinc y aluminio.

**Tabla 38. Resultados de la evaluación de los usuarios-estudiantes**

USUARIO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	PUNTAJE	% PARCIAL
1	3	4	5	5	4	5	5	3	5	4	43	86
2	3	4	5	4	5	3	4	5	3	5	41	82
3	5	5	5	4	4	4	4	4	4	5	44	88
4	4	5	5	4	3	5	5	5	5	5	46	92
5	3	4	2	3	4	4	3	3	5	4	35	70
6	4	5	4	5	3	5	5	4	4	5	44	88
7	4	4	3	2	2	3	5	3	4	3	33	66
8	5	4	3	3	3	3	4	5	5	4	39	78
9	5	5	4	4	5	5	4	2	4	5	43	86
10	2	4	5	3	4	3	3	4	3	2	33	66
11	3	3	3	4	3	2	5	5	4	3	35	70
<b>TOTAL</b>											436	79,3

*Fuente: Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. Elaborado por: Elaboración propia*

Como se puede apreciar en la tabla anterior, más de la mitad de los estudiantes tienen un agrado por el uso del simulador horno de fundición de aluminio-zinc. De un total de 550 puntos disputados en la evaluación de usuario, se han obtenido un puntaje de 436 puntos, consiguiendo que el 79 % de los usuarios-estudiantes están motivados por el uso del simulador horno de fundición de aluminio-zinc. Es beneplácito obtener resultados positivos, enfatizando que se puede mejorar las prácticas metalúrgicas de los metales como el zinc y el aluminio, conveniente para la industria de Cotopaxi caracterizada por el trabajo metalmecánico, además para la academia que puede obtener una educación interactiva con el uso de la tecnología, formando profesionales de tercer nivel capacitados para emprender y desarrollar buenas prácticas industriales.

### 3.5. Evaluación de resultados

En la evaluación de resultados se realiza en primera instancia pruebas en tiempo real del proceso de fundición del zinc y el aluminio; estableciendo estas pruebas se puede determinar la tolerancia o el error aproximado del simulador de horno de

fundición diseñado en MATLAB, además de comprobar el análisis de los resultados mostrados en el apartado 3.1 del presente capítulo. La tabla 39 muestra los instrumentos utilizados para efectuar el proceso de fundición en tiempo real.

**Tabla 39. Instrumentos e insumos para la fundición en tiempo real**

Instrumento e insumo	Descripción
	<p>Horno de fundición de tipo resistivo empleado para el proceso metalúrgico tanto del zinc como el aluminio</p>
	<p>Energía térmica generada por dispositivo BLOWER para el calentamiento del horno de fundición</p>
	<p>Sistema de control ON/OFF para la temperatura del horno de fundición</p>
	<p>Carbón utilizado para el proceso de fundición del zinc y el aluminio</p>

	<p>Pirómetro utilizado para la obtención de métricas de la temperatura en el proceso de fundición del zinc y el aluminio</p>
---	--

*Fuente: Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. Elaborado por: Elaboración propia*

La tabla 40 muestra los objetos metálicos de aluminio y su peso, utilizados para efectuar el proceso de fundición en tiempo real.

**Tabla 40. Objetos metálicos de aluminio con su peso**

Objeto metálico	Peso
	<p>2 Kg</p>
	<p>4 Kg</p>

	<p>7 Kg</p>
---	-------------

*Fuente: Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. Elaborado por: Elaboración propia*

La tabla 41 muestra los resultados de las variables de tiempo y temperatura del proceso de fundición del aluminio en tiempo real.

**Tabla 41. Proceso de fundición del aluminio en tiempo real**

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Observación
2		58.5 °C
4		64.5 °C
6		70.2 °C

8	 <p>A hand holds a blue infrared thermometer in front of a fire. The thermometer's LCD screen displays '198.7' and '2780'.</p>	198.7°C
10	 <p>A hand holds a blue infrared thermometer in front of a fire. The thermometer's LCD screen displays '206.3' and '2780'.</p>	206.3°C
12	 <p>A hand holds a blue infrared thermometer in front of a fire. The thermometer's LCD screen displays '328.1' and '2516'.</p>	328 °C
14	 <p>A hand holds a blue infrared thermometer in front of a fire. The thermometer's LCD screen displays '370.9' and '3757'.</p>	370.9 °C
16	 <p>A hand holds a blue infrared thermometer in front of a fire. The thermometer's LCD screen displays '592.8' and '6271'.</p>	592.8 °C

18		629.3 °C
22		679.3 °C
26		744.1 °C
28		876.1 °C
30		Proceso de fundición culminado tiempo estimado 30 minutos

-		Visualización en el molde para posterior enfriamiento del aluminio
-		Escoria producida por la fundición

*Fuente: Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. Elaborado por: Elaboración propia*

La tabla 42 muestra los objetos metálicos de zinc y su peso, utilizados para efectuar el proceso de fundición en tiempo real.

**Tabla 42. Objetos metálicos de zinc con su peso**

Objeto metálico	Peso
	1 Kg
	3 Kg

	<p>5 Kg</p>
---	-------------

*Fuente: Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. Elaborado por: Elaboración propia*

La tabla 43 muestra los resultados de las variables de tiempo y temperatura del proceso de fundición del zinc en tiempo real.

**Tabla 43. Proceso de fundición del zinc en tiempo real**

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Observación
0		100 °C
2		169 °C
4		327 °C

6		332.5 °C
8		416.5 °C
10		440.3 °C
12		457 °C
16		759 °C

25		Visualización en el molde para posterior enfriamiento del aluminio.
----	---	---

*Fuente: Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. Elaborado por: Elaboración propia*

La tabla 44 muestra la escoria de aluminio y zinc con su peso, producida en el proceso de fundición en tiempo real.

**Tabla 44. Escoria de aluminio y zinc con su peso**

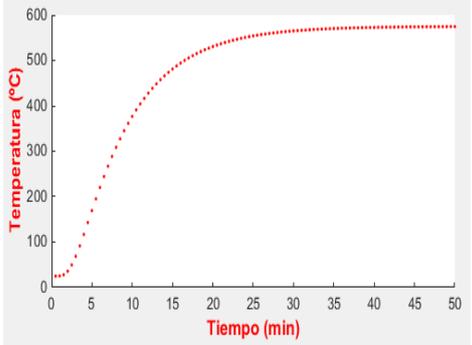
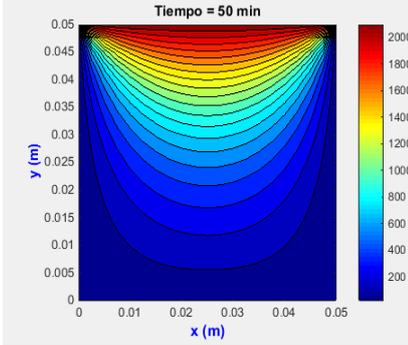
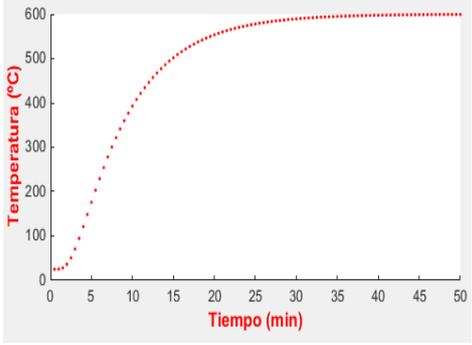
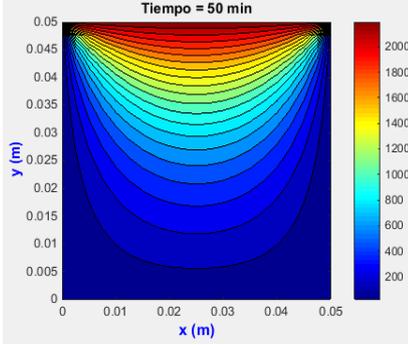
Escoria producida	Peso
	0.92 Kg
	1 Kg
	1.4 Kg



Fuente: Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. Elaborado por: Elaboración propia

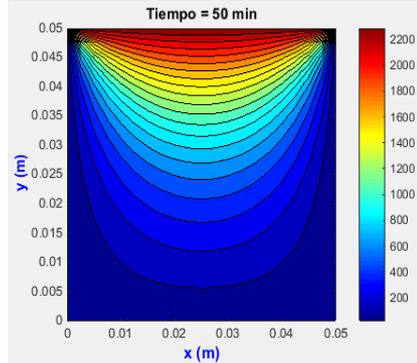
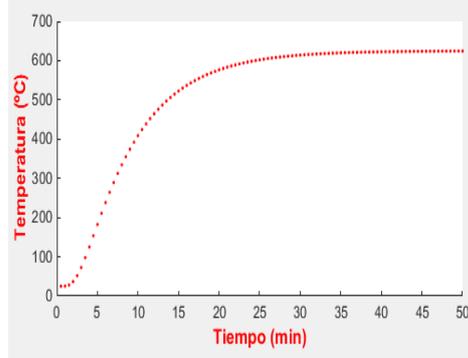
La tabla 45 muestra los resultados de las variables de tiempo y temperatura del proceso de fundición del aluminio con el simulador.

Tabla 45. Proceso de fundición del aluminio con el simulador

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Observación
27		
<p>En la primera simulación, en un tiempo de 27 minutos el simulador de horno de fundición para el aluminio llega a fundir el metal a una temperatura aproximada de 570 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurren en un tiempo aproximado de 20 minutos y a una temperatura de 500 °C. El precalentamiento inicia a una temperatura de 51 °C en aproximadamente de 2 a 3 minutos. En lo que respecta al espectro térmico, se muestra que la temperatura máxima del horno llegará a 2000 °C en aproximadamente 50 minutos; con una transición de estado sólido a líquido, en una temperatura que va desde 600 a 800 °C.</p>		
25		

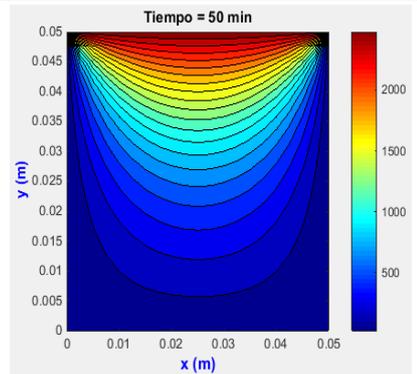
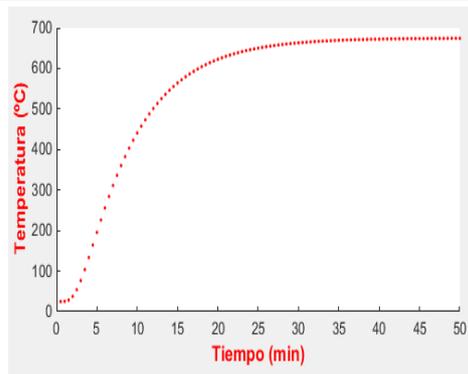
En la segunda simulación, en un tiempo de 25 minutos el simulador de horno de fundición para el aluminio llega a fundir el metal a una temperatura aproximada de 590 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurre en un tiempo aproximado de 18 minutos y a una temperatura de 505 °C. El precalentamiento inicia a una temperatura de 45 °C en aproximadamente de 2 minutos. En lo que respecta al espectro térmico, se muestra que la temperatura máxima del horno llegará a 2500 °C en aproximadamente 50 minutos; con una transición de estado sólido a líquido, en una temperatura que va desde 600 a 800 °C.

22

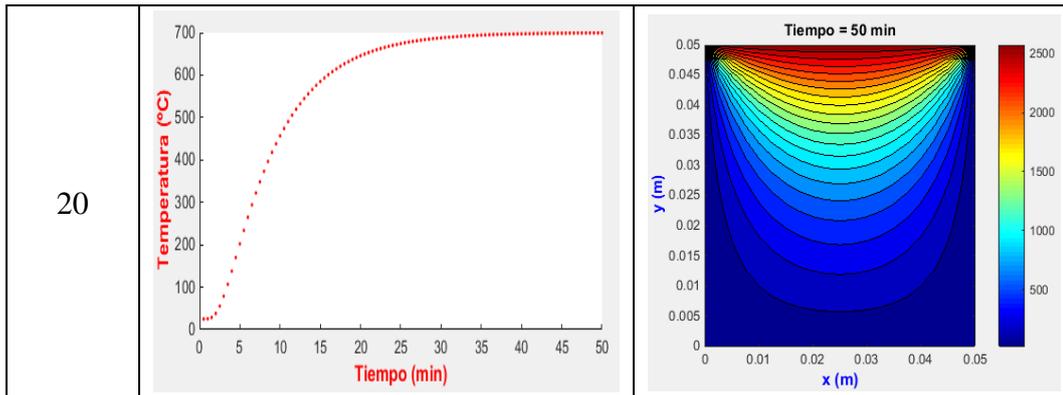


En la tercera simulación, en un tiempo de 22 minutos el simulador de horno de fundición para el aluminio llega a fundir el metal a una temperatura aproximada de 600 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurre en un tiempo aproximado de 14 minutos y a una temperatura de 510 °C. El precalentamiento inicia a una temperatura de 28 °C en aproximadamente de 1.6 minutos. En lo que respecta al espectro térmico, se muestra que la temperatura máxima del horno llegará a 2200 °C en aproximadamente 50 minutos; con una transición de estado sólido a líquido, en una temperatura que va desde 630 a 806 °C.

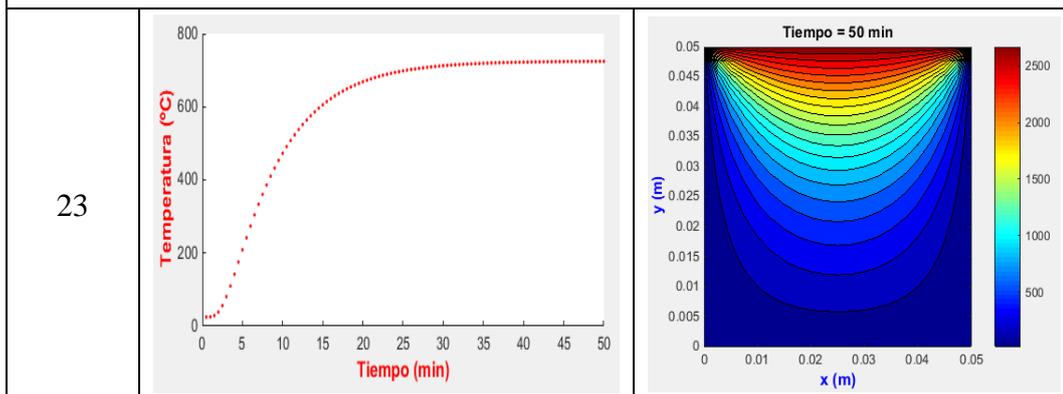
19



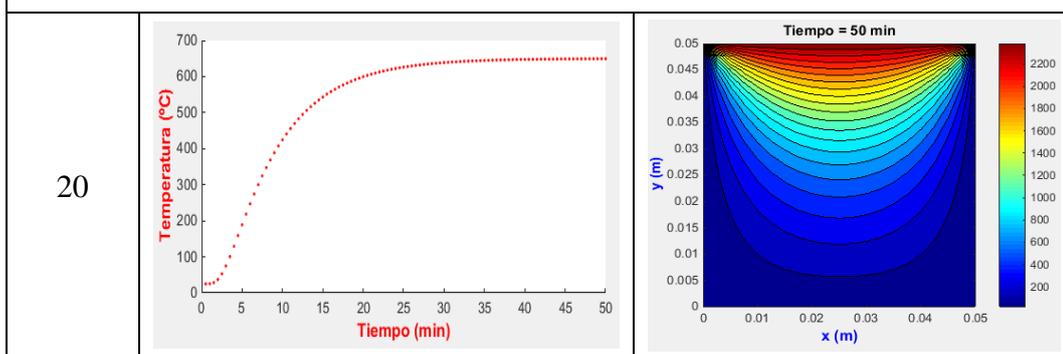
En la cuarta simulación, en un tiempo de 19 minutos el simulador de horno de fundición para el aluminio llega a fundir el metal a una temperatura aproximada de 603 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurre en un tiempo aproximado de 17,5 minutos y a una temperatura de 600 °C. El precalentamiento inicia a una temperatura de 36 °C en aproximadamente de 2,2 minutos. En lo que respecta al espectro térmico, se muestra que la temperatura máxima del horno llegará a 2500 °C en aproximadamente 50 minutos; con una transición de estado sólido a líquido, en una temperatura que va desde 500 a 900 °C.



En la quinta simulación, en un tiempo de 20 minutos el simulador de horno de fundición para el aluminio llega a fundir el metal a una temperatura aproximada de 620 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurren en un tiempo aproximado de 17,7 minutos y a una temperatura de 613 °C. El precalentamiento inicia a una temperatura de 32 °C en aproximadamente de 3 a 4 minutos. En lo que respecta al espectro térmico, se muestra que la temperatura máxima del horno llegará a 2500 °C en aproximadamente 50 minutos; con una transición de estado sólido a líquido, en una temperatura que va desde 500 a 780 °C.



En la sexta simulación, en un tiempo de 25 minutos el simulador de horno de fundición para el aluminio llega a fundir el metal a una temperatura aproximada de 630 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurren en un tiempo aproximado de 14 minutos y a una temperatura de 606 °C. El precalentamiento inicia a una temperatura de 38 °C en aproximadamente de 1,4 minutos. En lo que respecta al espectro térmico, se muestra que la temperatura máxima del horno llegará a 2500 °C en aproximadamente 50 minutos; con una transición de estado sólido a líquido, en una temperatura que va desde 620 a 900 °C.

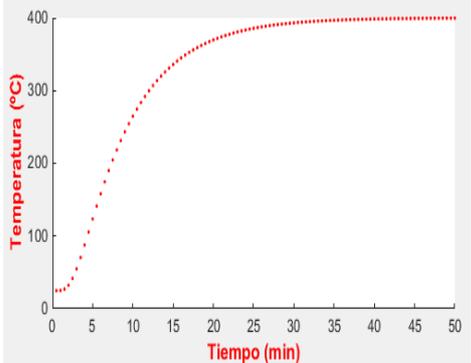
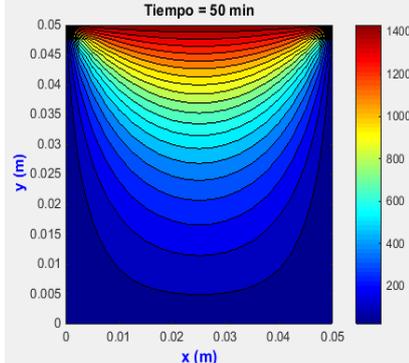
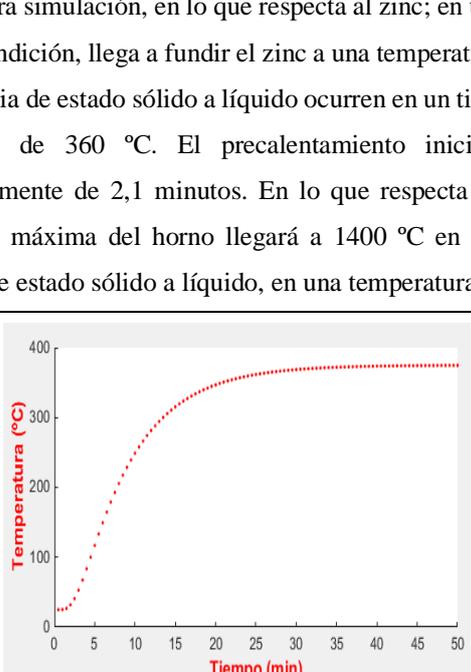
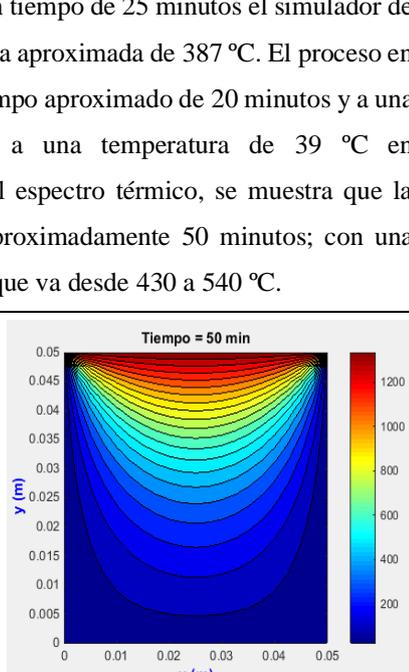


En la séptima simulación, en un tiempo de 20 minutos el simulador de horno de fundición para el aluminio llega a fundir el metal a una temperatura aproximada de 600 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurren en un tiempo aproximado de 16 minutos y a una temperatura de 570 °C. El precalentamiento inicia a una temperatura de 37 °C en aproximadamente de 1,5 a 2,2 minutos. En lo que respecta al espectro térmico, se muestra que la temperatura máxima del horno llegará a 2300 °C en aproximadamente 50 minutos; con una transición de estado sólido a líquido, en una temperatura que va desde 630 a 807 °C.

*Fuente: Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. Elaborado por: Elaboración propia*

La tabla 46 muestra los resultados de las variables de tiempo y temperatura del proceso de fundición del zinc con el simulador.

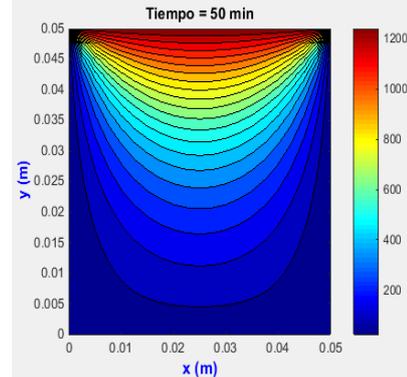
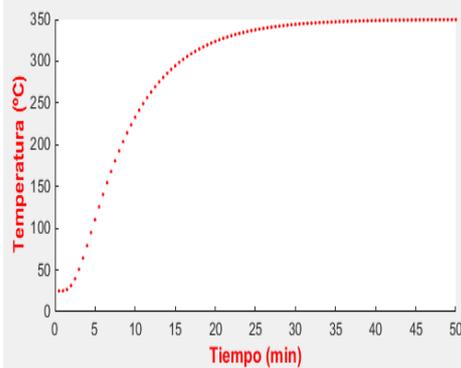
**Tabla 46. Proceso de fundición del zinc con el simulador**

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Observación
25		
26		

En la primera simulación, en lo que respecta al zinc; en un tiempo de 25 minutos el simulador de horno de fundición, llega a fundir el zinc a una temperatura aproximada de 387 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurren en un tiempo aproximado de 20 minutos y a una temperatura de 360 °C. El precalentamiento inicia a una temperatura de 39 °C en aproximadamente de 2,1 minutos. En lo que respecta al espectro térmico, se muestra que la temperatura máxima del horno llegará a 1400 °C en aproximadamente 50 minutos; con una transición de estado sólido a líquido, en una temperatura que va desde 430 a 540 °C.

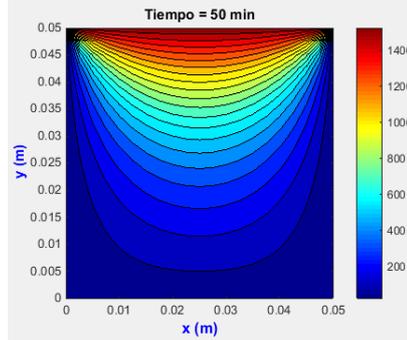
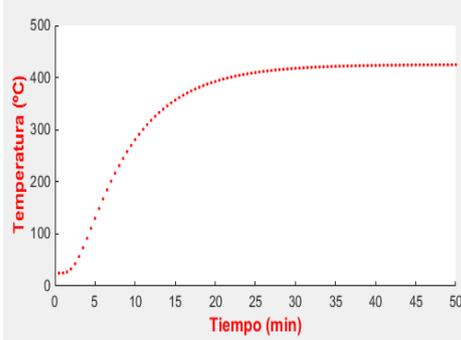
En la segunda simulación, en lo que respecta al zinc; en un tiempo de 26 minutos el simulador de horno de fundición, llega a fundir el zinc a una temperatura aproximada de 370 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurre en un tiempo aproximado de 21 minutos y a una temperatura de 350 °C. El precalentamiento inicia a una temperatura de 36 °C en aproximadamente de 2,3 minutos. En lo que respecta al espectro térmico, se muestra que la temperatura máxima del horno llegará a 1300 °C en aproximadamente 50 minutos; con una transición de estado sólido a líquido, en una temperatura que va desde 400 a 500 °C.

28

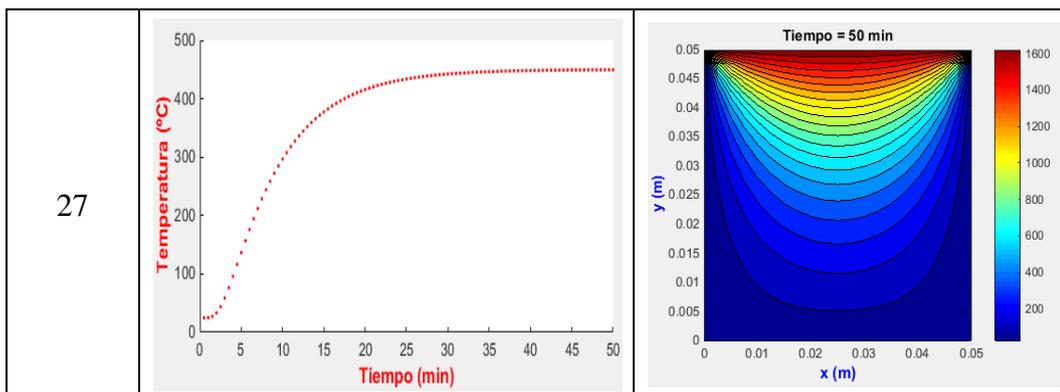


En la tercera simulación, en lo que respecta al zinc; en un tiempo de 28 minutos el simulador de horno de fundición, llega a fundir el zinc a una temperatura aproximada de 349 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurre en un tiempo aproximado de 23 minutos y a una temperatura de 340 °C. El precalentamiento inicia a una temperatura de 25 °C en aproximadamente de 2 minutos. En lo que respecta al espectro térmico, se muestra que la temperatura máxima del horno llegará a 1200 °C en aproximadamente 50 minutos; con una transición de estado sólido a líquido, en una temperatura que va desde 390 a 480 °C.

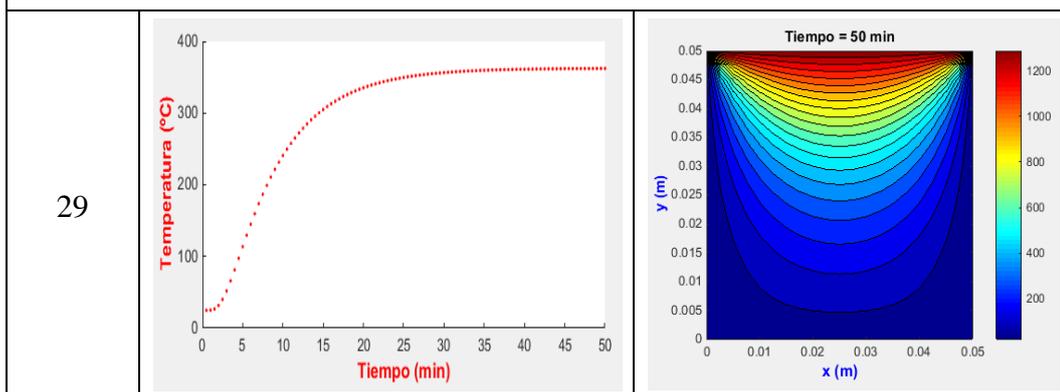
25



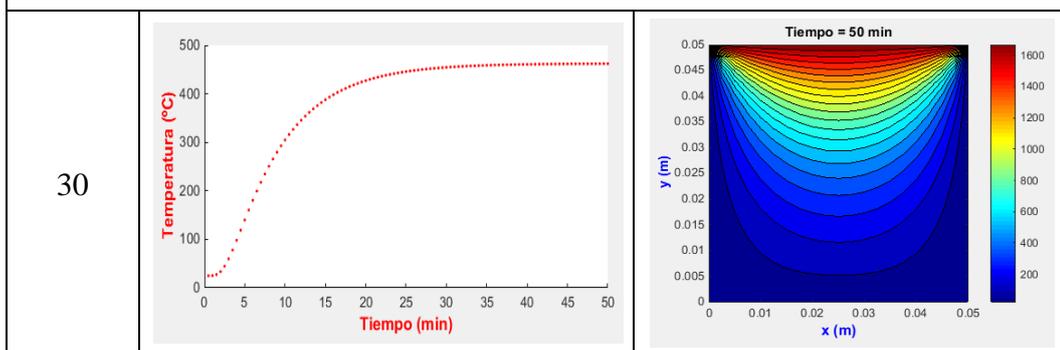
En la cuarta simulación, en lo que respecta al zinc; en un tiempo de 25 minutos el simulador de horno de fundición, llega a fundir el zinc a una temperatura aproximada de 404 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurre en un tiempo aproximado de 22 minutos y a una temperatura de 383 °C. El precalentamiento inicia a una temperatura de 33 °C en aproximadamente de 1,8 a 2,1 minutos. En lo que respecta al espectro térmico, se muestra que la temperatura máxima del horno llegará a 1500 °C en aproximadamente 50 minutos; con una transición de estado sólido a líquido, en una temperatura que va desde 400 a 520 °C.



En la quinta simulación, en lo que respecta al zinc; en un tiempo de 27 minutos el simulador de horno de fundición, llega a fundir el zinc a una temperatura aproximada de 408 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurren en un tiempo aproximado de 21 minutos y a una temperatura de 403 °C. El precalentamiento inicia a una temperatura de 35 °C en aproximadamente de 1,9 a 2,3 minutos. En lo que respecta al espectro térmico, se muestra que la temperatura máxima del horno llegará a 1600 °C en aproximadamente 50 minutos; con una transición de estado sólido a líquido, en una temperatura que va desde 490 a 560 °C.



En la sexta simulación, en lo que respecta al zinc; en un tiempo de 29 minutos el simulador de horno de fundición, llega a fundir el zinc a una temperatura aproximada de 371 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurren en un tiempo aproximado de 25 minutos y a una temperatura de 359 °C. El precalentamiento inicia a una temperatura de 38 °C en aproximadamente de 2 minutos. En lo que respecta al espectro térmico, se muestra que la temperatura máxima del horno llegará a 1225 °C en aproximadamente 50 minutos; con una transición de estado sólido a líquido, en una temperatura que va desde 390 a 500 °C.



En la séptima simulación, en lo que respecta al zinc; en un tiempo de 30 minutos el simulador de horno de fundición, llega a fundir el zinc a una temperatura aproximada de 420 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurren en un tiempo aproximado de 23 minutos y a una temperatura de 408 °C. El precalentamiento inicia a una temperatura de 32 °C en aproximadamente de 2,3 minutos. En lo que respecta al espectro térmico, se muestra que la temperatura máxima del horno llegará a 1600 °C en aproximadamente 50 minutos; con una transición de estado sólido a líquido, en una temperatura que va desde 480 a 600 °C.

*Fuente: Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi. Elaborado por: Elaboración propia*

### **3.6. Conclusiones Capítulo III**

- Los resultados obtenidos a través de simulaciones mostraron que tanto el modelo matemático para el cálculo de la carga térmica como el de programación de la fundición son flexibles a las demandas y necesidades del horno en tiempo y temperatura, además de ser eficientes en cuanto a la minimización óptima de errores de los ejemplos prácticos evaluados, se notó que en los tres procesos, en los cálculos de prueba, llegó a presentar una escoria de 1,94 Kg de escoria en el aluminio y de 1,55 Kg de escoria respecto al zinc, mostrando la eficiencia siguiendo las condiciones establecidas, demuestra confiabilidad en el cumplimiento de los límites de cada elemento.
- El simulador de horno para los procesos de fundición del aluminio y el zinc permite la predicción de temperatura y tiempo en cuanto a los parámetros matemáticos de ingreso, particularmente a la geometría y peso del modelo a ser fundido; el simulador desarrollado a través del GUIDE de MATLAB y transformado en una interfaz GUI intuitiva y de fácil operación permite caracterizar en una forma de onda de temperatura versus tiempo, la gráfica de la fundición.
- La modelación matemática que describe el proceso de fundición del aluminio y zinc al estado de colada continua están influenciados principalmente por la temperatura del horno 660 °C aproximadamente para la fundición del aluminio y 460 °C aproximadamente para la fundición del zinc; además del espesor promedio del modelo comúnmente de 5,90 mm a 6,30 mm; pero también puede aplicarse para todo tipo de aluminio-zinc y espesores para analizar el comportamiento en el modelo matemático.

## CONCLUSIONES GENERALES

- La identificación y modelamiento matemático del comportamiento térmico del proceso de fundición del zinc y aluminio permitió observar de manera general el panorama actual que existe en la aplicación de tecnologías con hornos de resistencia en la industria de la metalurgia, a través de la demostración simulada para sistemas radiantes, la aplicación de estos análisis permitirá mejorar las condiciones del horno de fundición, así como el ahorro de recursos particularmente energéticos y económicos.
- La categorización de los procesos de fundición del zinc y aluminio que rige el dimensionamiento matemático y computacional presenta un modelo de horno resistivo, demostrando la efectividad del balance de masa al no considerar impurezas en el aluminio, el modelo no toma en cuenta la pérdida de masa en el metal; todo el aluminio sólido que se coloca en el horno sale como aluminio líquido, no se consideran cambios químicos. Por otro lado, se distinguen dos fases en el proceso: el precalentamiento; y la fusión del aluminio y el zinc.
- El establecimiento de los procesos de fundición del zinc y aluminio en una herramienta informática de alto desempeño en el modelamiento matemático, y el análisis de la literatura develaron que el precalentamiento implica casi el 50% de la energía consumida en una fusión promedio de 9 Kg; esto visualiza que se debe buscar un posible ahorro de energía, proceso que puede lograrse con la implementación de un refractario con mejores propiedades térmicas que permita reducir el espesor de las paredes del horno, para el caso se puede utilizar refuerzos de  $Cr_2O_3$  o de  $ZrO_2$  o de algún material que tenga mayor resistencia al choque térmico, como alúmina reforzada con plaquetas de carbón que no requiera invertir demasiado tiempo en el precalentamiento.
- Con los datos experimentales se pudo verificar el buen funcionamiento de la simulación, las diferencias que se encontraron en el proceso de precalentamiento es del 10,5% para el aluminio y 9,6% para el zinc, mientras que en el proceso de fundición es de 9,7% para el aluminio y 8,9 para el zinc en la mayoría de los casos, lo que demuestra que el modelo tiene un gran potencial para simular con

exactitud el funcionamiento del horno de prueba. Esto es de gran importancia, ya que una simulación validada ahorra tiempo y dinero en un proyecto de investigación hacia los procesos metalúrgicos. Con la simulación realizada se pueden proponer distintos escenarios: cambios en las propiedades del material, masa del aluminio, temperaturas iniciales o tiempos de operación lo que conduce a propuestas para mejorar el sistema y optimizar el proceso de fundición del zinc y del aluminio.

- El estudio demostró que la alta temperatura de las paredes del horno es la mayor pérdida energética que hay dentro del proceso, la simulación mostró que existen irreversibilidades que hacen que el proceso de precalentamiento y fundición fluctúen en el tiempo más no en la temperatura debido a la calidad de la fuente de energía y la capacidad del soplador caliente Blower para enviar exergía directamente al metal, sin intermediarios y sin pérdidas de energía en la transferencia de calor.
- Los resultados de la evaluación de la simulación de los procesos de fundición del zinc y aluminio son muy prometedores, sin embargo se pueden mejorar al incluir un análisis de impurezas en el aluminio y el zinc, y cómo afectan al desempeño del sistema, así como ejemplos que simulen los transitorios entre carga y descarga de la colada del metal durante la operación en continuo; el estudio deja la pauta para investigaciones futuras que permitan hacer de los procesos de fundición del aluminio y el zinc, más eficientes y ecológicos; mejorando la eficiencia energética y disminuir así el impacto medio ambiental.

## RECOMENDACIONES

- En el proceso de obtención del modelo matemático se facilita el mismo con la forma física del horno de fundición, debido a que este hecho permite obtener las constantes físicas del sistema. En este caso se tuvieron que asumir ciertos casos y justificar los mismos.
- Tener una bibliografía que comprenda todo sobre el modelo a desarrollar. Esta puede tener artículos de revistas científicas, papers, normas de calidad que detallen sus condiciones físicas y el proceso de obtención de las constantes del sistema los que serán empleados como datos para efectivizar el modelo.
- Indagar tutoriales sobre cada uno de las herramientas informáticas y familiarizarse con los algoritmos a ser empleados durante la implementación del simulador ya que pueden existir funciones que pueden ser acopladas de acuerdo a los modelos y diseño del simulador del horno de fundición de aluminio y zinc.
- Para simulaciones y pruebas futuras del modelo de horno de fundición de aluminio y zinc se puede utilizar el software OpenModelica que permite representar modelos fenomenológicos además de realizar análisis de transferencia de calor. Otro software que se podría utilizar es Simno 3.0 para comparar la respuesta del sistema con la realizada en MATLAB.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Peiro, J. “Hierro y acero maravillas modernas”. Año 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.youtube.com/watch?v==ovgJBHKBDYA>. Último acceso: 02/03/2020
- [2] Santiago, M. “Compendio de normas para productos de acero”. Año 2000. [En línea]. Disponible en: <http://www.aza.cl>. Último acceso: 02/03/2020
- [3] Constitución de la República del Ecuador. “Registro Oficial, Suplemento N° 10”. Edición Electrónica. Año 2008. [En línea]. Disponible en: [https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4\\_ecu\\_const.pdf](https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf). Último acceso: 02/09/2020
- [4] Ministerio Coordinador de la Producción, Empleo y Competitividad (MCPEC). “Technical study for the identification of a trade policy for the metal-mechanic sector in Ecuador”. Año 2010, Ecuador, Quito.
- [5] MIPRO. “Metallurgical and iron and steel reverse trade fair for the automotive sector”. Año 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.youtube.com/watch?v==MqCixN1Z4L4>. Último acceso: 02/03/2020
- [6] Ingeniarien Goi Eskola. “Simulación numérica de procesos de fundición”. Técnicas Avanzadas de Moldeo y Conformado. Año 2013. [En línea]. Disponible en: [http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/895\\_ca.pdf](http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/895_ca.pdf). Último acceso: 02/03/2020.
- [7] Posadas, H. Optimization of a feeding system for the production of aluminum heads by the gravity process. Universidad Autónoma de Nuevo León [2012]. Disponible de: <http://eprints.uanl.mx/3140/1/1080256572.pdf>
- [8] Vallejo, J. Simulación de fundición por ordenador mediante QuikCAST. Universidad Zaragoza [2013]. Disponible de: <http://zaguan.unizar.es/record/10542/files/TAZ-PFC-2013-240.pdf>

- [9] Cangás, J., Valverde, E. Estudio del proceso de solidificación en fundición de aluminio para brazos del sistema de freno de un ascensor, mediante elementos finitos. Escuela Politécnica Nacional [2014]. Disponible de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8080/4/CD-5695.pdf>
- [10] Escudero, A. Modelado matemático para la obtención de coeficientes de transferencia de calor en aleaciones de aluminio hipoeutécticas. Universidad Autónoma de Nuevo León. Disponible de: <http://eprints.uanl.mx/15719/1/1080238126.pdf>
- [11] Silva, L. Study of the aluminum gravity casting process for the manufacture of electrical hardware and proposal of an improvement plan at Metallan S.A.S. Universidad Pontificia Bolivariana. Disponible de: [https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/5648/digital\\_37545.pdf?sequence=1](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/5648/digital_37545.pdf?sequence=1)
- [12] Araque, C. O., & Orejarena, M. G. (2017). Energy analysis of an electric resistance furnace based on perturbations of the heating process. Universidad Industrial de Santander, pp.17-20.
- [13] Bazzana, S., Hegoburu, P., Ordoñez, M., & Pieck, D. (2018). Hornos y tratamientos Termicos. Materiales y Combustibles Nucleares 2008, pp.7-12.
- [14] García, M. B., & Muñoz, P. E. (2013). Diseño y construcción de un horno de fundición basculante de crisol para la Facultad de Mecánica Naval. Universidad Layca "Eloy Alfaro" de Manabí, pp.22-26.
- [15] Herrejos, E. M. (2011). Diseño y construcción de un horno de resistencias de recalentamiento de forma cilíndrica. Universidad de Michuacana de San Nicolás de Hidalgo, pp.39-42.
- [16] Lee, H., Oh, J., & Lee, D. (1990). Metallurgical Transactions B. Purification of Tin by Zona Refining with Development of a New Models, Vol. 21 b, pp.127-138.

- [17] Pérez, P. F., & Soto, P. A. (2019). Diseño, cálculo y construcción de un horno de fundición de aluminio tipo basculante y sus moldes. Universidad De Pamplona - Departamento de Ingeniería Mecánica.
- [18] Rozas, G. J. (2010). Design and fabrication of a magnesium alloy casting campaign. Proyecto Fin De Carrera, pp.23-33.
- [19] Coin Blower, Ventiladores industriales y colectores de polvo. Sexta Edición.2018. Editorial Wheelabrator Air Pollution Control USA.
- [20] Hascon Engineeringeny. Sistemas de filtración de Airee y ventilación, Italy All rights reserved 2019.
- [21] Geankoplis J. Chistie Proceso de transportes y operaciones unitarias S.A. México 2018 quinta edición 2018.
- [22] Ballesteros Tajadura Rafael, Flujo en Ventiladores Axiales de Paso Variable Universidad de Oviedo. Publicaciones 2018
- [23] Roldán, José Neumática, hidráulica y mecánica industrial Sexta edición. Editorial paraninfo, Madrid nueva edición 2017.
- [24] Metal Handbook, selection and Aplication Of Copper and Copper Alloy Castings, Vol.2 USA, 1989.
- [25] Mott, Robert. 2016. Diseño de elementos de máquinas. Cuarta Edición s.l., Editorial Pearson Educación, 2016, pp.16-29.
- [26] Presas, Mata Marina. 2013 - 2014. Microestructura y propiedades mecánicas del SiC biomórfico. Madrid: s.n., 2013 - 2014.
- [27] SCHMID, Serope Kalpakjian – Steven. Manufactura, Ingenieria y tecnología. Cuarta Edición. pp. 125-136
- [28] Gerling, Heinrich. “Moldeo y conformación”. España, Editorial Reverté, S.A., 1979. ISBN 84-291-6051-5.

- [29] Campbell, John. “Castings”. Londres, Butterworth – Heinemann, 1991. ISBN 0-7506-1696-2.
- [30] Heine, Richard W. “Principles of metal casting”. Estados Unidos, McGraw-Hill, 1967.
- [31] Street, Robert L. “Elementary Fluid Mechanics”. Estados Unidos, John Wiley & Sons, Inc, 1996. ISBN 0-471-01310-2.
- [32] Incropera, Frank P. “Fundamentos de transferencia de calor”. Mexico, Prentice Hall, 1999. ISBN 970-17-0170-4.
- [33] Çengel, Yunus A. “Termodinamica”. Mexico, McGraw Hill, 2003. ISBN 970-10-3966-1.
- [34] ESI GROUP, “Procast user manual”. Francia, ESI Group, 2005.
- [35] FINITE SOLUTIONS, “SolidCast training course workbook”, Estados Unidos, Finite Solutions incorporated, 2017.
- [36] FINITE SOLUTIONS, “FlowCast training course workbook”, Estados Unidos, Finite Solutions incorporated, 2016.
- [37] Ogata Katsuhiko, Ingeniería de Control Moderna, España, Madrid, Editorial Pearson, 2010.
- [38] Ogata Katsuhiko, Dinámica de sistemas, México, México D.F. Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana, 1987.
- [39] MATEMATICAS.US, “Descripción teórica de los software de proceso matemático y Sistemas de Cálculo Numérico (SCN)”. [En línea]. Disponible en: <http://www.matematicas.us.es/informacion-general-mp/software-matematico>.
- [40] MATHWORKS.ORG, “Fundamentación y descripción de MATLAB”. [En línea]. Disponible en: <http://www.mathworks.org/matlab/documentation.html>.

[41] SOFTIN.INFO, “Antecedentes y argumentos teóricos de LABVIEW”. [En línea]. Disponible en: <http://softin.info/labview-long/>.

[42] SCILAB.ORG, “Documentación y fundamentación contextual del programa SCILAB”. [En línea]. Disponible en: <http://www.scilab.org/products/scilab/documentation>.

[43] GNU.ORG, “Fundamentos y características principales de GNU Octave”. [En línea]. Disponible en: <http://www.gnu.org/software/octave/documentation>.

[44] MAPLESOFT.COM, “Descripción y fundamentación específica de MAPLE”. [En línea]. Disponible en: <http://www.maplesoft.com/maple/documentation>.

## ANEXOS

### ANEXO 1. CÓDIGO EN MATLAB FUNDICIÓN DEL ZINC Y ALUMINIO

#### Portada

El siguiente script muestra el diseño GUI de la portada del horno simulador de fundición de zinc y aluminio



*Figura Anexo 1.1: Portada. Elaborado por: Elaboración propia*

#### Código de programación:

```
function varargout = portada(varargin)
% PORTADA MATLAB code for portada.fig
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @portada_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @portada_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% --- Executes just before portada is made visible.
```

```

function portada_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
background=imread('C:\HORNO\imagenes\fundicion.jpg');
axes(handles.background);
axis off;
imshow(background);
background1=imread('C:\HORNO\imagenes\bnUTC.png');
axes(handles.background1);
axis off;
imshow(background1);
% Choose default command line output for portada
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = portada_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
close(gcf)
fundza

```

## GUIDE Principal:

La siguiente figura muestra la interfaz principal del horno de fundición y su respectivo código de programación

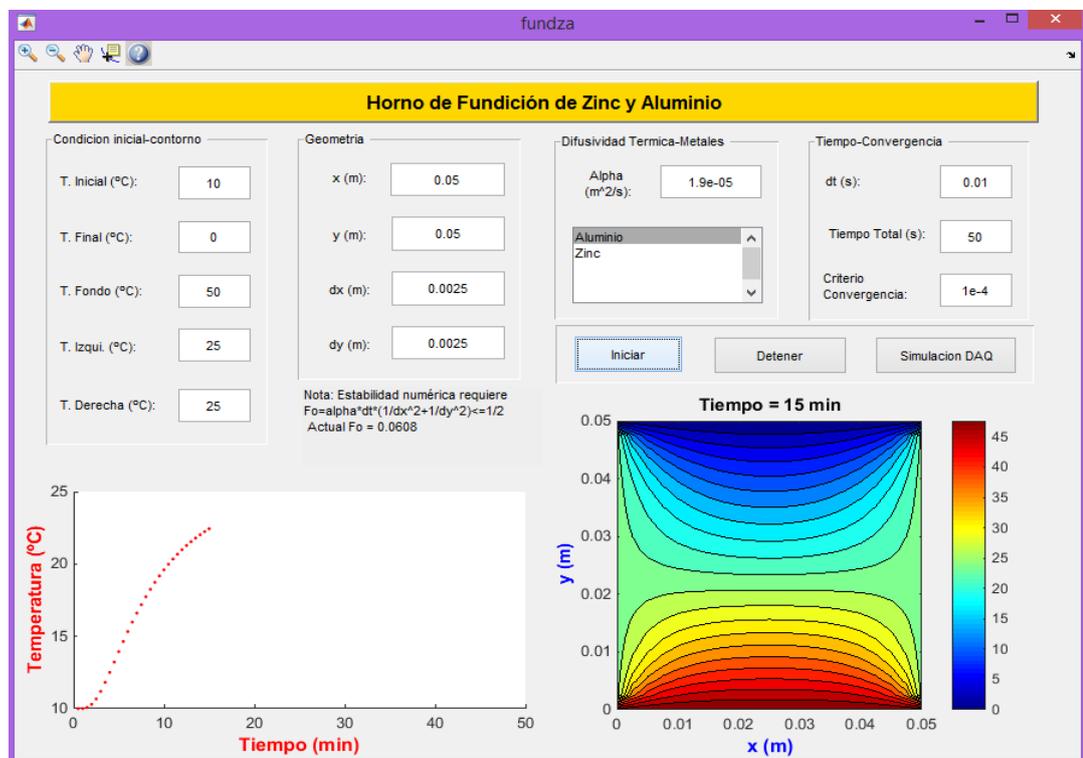


Figura Anexo 1.2: Interfaz principal. Elaborado por: Elaboración propia

## Código de programación:

```
function varargout = fundza(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
    'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @fundza_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn',  @fundza_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn',  [] , ...
    'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

% --- Executes just before transientConductionGUI is made visible.
function fundza_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.

% Create the help button on toolbar
[X, map] = imread(fullfile(...
    matlabroot, 'toolbox', 'matlab', 'icons', 'csh_icon.gif'));
icon = ind2rgb(X, map);
uipushbutton(handles.uitoolbar1, 'CData', icon, ...
    'TooltipString', 'Help', ...
    'ClickedCallback', @AppHelp);

% Choose default command line output for transientConductionGUI
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = fundza_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function handles = getpara(handles)
% Obtener la entrada para mostrar el número de Fo actual
handles.data.T_int = str2double(get(handles.T_int, 'String'));
handles.data.T_top = str2double(get(handles.T_top, 'String'));
handles.data.T_btm = str2double(get(handles.T_btm, 'String'));
handles.data.T_lft = str2double(get(handles.T_lft, 'String'));
handles.data.T_rht = str2double(get(handles.T_rht, 'String'));
handles.data.L = str2double(get(handles.L, 'String'));
handles.data.H = str2double(get(handles.H, 'String'));
handles.data.dx = str2double(get(handles.dx, 'String'));
handles.data.dy = str2double(get(handles.dy, 'String'));
```

```

handles.data.tmax = str2double(get(handles.tmax, 'String'));
handles.data.dt = str2double(get(handles.dt, 'String'));
handles.data.epsilon = str2double(get(handles.epsilon, 'String'));
% Preseleccionar la difusividad térmica
listStrings = get(handles.listalp, 'String');
domaintype = listStrings{get(handles.listalp, 'Value')};
handles.data.alp = domainalp;
set(handles.alp, 'String', handles.data.alp);
% Calcula el número Fo
handles.data.r_x =
handles.data.alp*handles.data.dt/handles.data.dx^2;
handles.data.r_y =
handles.data.alp*handles.data.dt/handles.data.dy^2;
fo = handles.data.r_x + handles.data.r_y;
set(handles.rx, 'String', ...
    sprintf('Nota: Estabilidad numérica requiere
Fo=alpha*dt*(1/dx^2+1/dy^2)<=1/2 \n Actual Fo = %g', fo));
if fo > 1/2
    warndlg({'Estabilidad numérica requiere Fo <= 1/2';
        sprintf('Actual Fo = %g', fo)}, 'Inestabilidad numérica');
end

function conduction(handles)
% Resolver numéricamente el problema de conducción transitoria
set(handles.stop, 'UserData', 0);
% obtener los parámetros de entrada
L = handles.data.L;
H = handles.data.H;
dx = handles.data.dx;
dy = handles.data.dy;
tmax = handles.data.tmax;
dt = handles.data.dt;
epsilon = handles.data.epsilon;
r_x = handles.data.r_x;
r_y = handles.data.r_y;
% crear la malla x, y basada en dx, dy
nx = uint32(L/dx + 1);
ny = uint32(H/dy + 1);
[X,Y] = meshgrid(linspace(0,L,nx), linspace(0,H,ny));
% tomar el punto central del dominio
ic = uint32((nx-1)/2+1);
jc = uint32((ny-1)/2+1);
% establecer las condiciones iniciales y de contorno
T = handles.data.T_int*ones(ny,nx);
T(:,1) = handles.data.T_lft;
T(:,end) = handles.data.T_rht;
T(1,:) = handles.data.T_btm;
T(end,:) = handles.data.T_top;
Tmin = min(min(T));
Tmax = max(max(T));
% iteración, marcha en el tiempo
n = 0;
nmax = uint32(tmax/dt);
while n < nmax
    if get(handles.stop, 'UserData') == 1
        break
    end
    n = n + 1;
    T_n = T;

```

```

    for j = 2:ny-1
        for i = 2:nx-1
            T(j,i) = T_n(j,i) + r_x*(T_n(j,i+1)-
2*T_n(j,i)+T_n(j,i-1))...
                + r_y*(T_n(j+1,i)-2*T_n(j,i)+T_n(j-1,i));
        end
    end
    if uint16(n/50) == n/50
        handles.fig.cont = contourf(handles.Tcontour,X,Y,T,20);
        title(handles.Tcontour, sprintf('Tiempo = %g min',n*dt)),
        colorbar('peer',handles.Tcontour),
        xlabel(handles.Tcontour,'x
(m)', 'FontSize',12, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b'), ylabel(handles
.Tcontour, 'y (m)', 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
        axis(handles.Tcontour, 'equal', 'tight'),
        handles.fig.pl =
scatter(handles.Tplot,n*dt,T(jc,ic), 'r. ');
        xlim(handles.Tplot, [0 tmax]), xlabel(handles.Tplot, 'Tiempo
(min)', 'FontSize',12, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'r'), ylabel(handl
es.Tplot, 'Temperatura
(°C)', 'FontSize',12, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'r')
        hold(handles.Tplot, 'on')
        pause(0.01)
    end
    err = max(max(abs((T-T_n))));
    if err <= epsilon
        break
    end
end

end

% --- Executes on button press in start.
function start_Callback(hObject, eventdata, handles)
cla(handles.Tplot);
cla(handles.Tcontour, 'reset');
handles = getpara(handles);
conduction(handles);
guidata(hObject,handles);

% --- Executes on button press in stop.
function stop_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to stop (see GCBO)
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.stop, 'UserData',1);

% --- Executes on selection change in listalp.
function listalp_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to listalp (see GCBO)
getpara(handles);
% guidata(hObject,handles);

function dx_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to dx (see GCBO)
getpara(handles);

function dy_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to dy (see GCBO)
getpara(handles);

```

```

% --- Executes on button press in title.
function title_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to title (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
close fundza
autoria

```

### Autoría:

La siguiente figura muestra la interfaz de autoría en conjunto con el código de programación.



*Figura Anexo 1.3: Interfaz ayuda. Elaborado por: Elaboración propia*

### Código de programación:

```

function varargout = autoria(varargin)
% AYUDA M-file for Ayuda.fig
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',  @autoria_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',   @autoria_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else

```

```

    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Ayuda is made visible.
function autoria_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% varargin    command line arguments to Ayuda (see VARARGIN)
background=imread('C:\HORNO\imagenes\electromecanica.jpg');
axes(handles.background);
axis off;
imshow(background);
background1=imread('C:\HORNO\imagenes\fundicion.jpg');
axes(handles.background1);
axis off;
imshow(background1);
% Choose default command line output for Ayuda
handles.output = hObject;

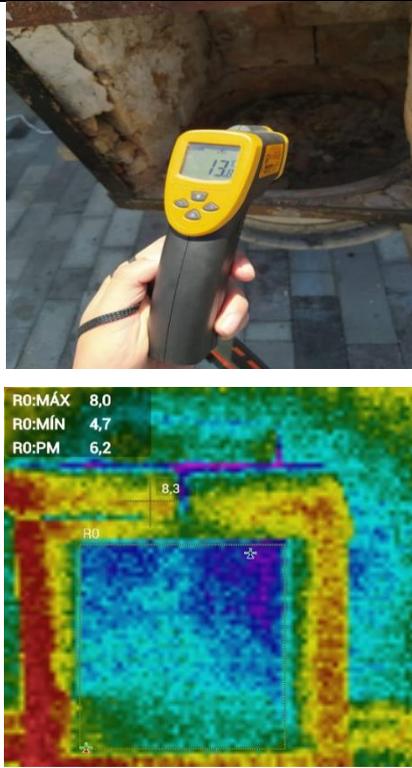
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = autoria_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

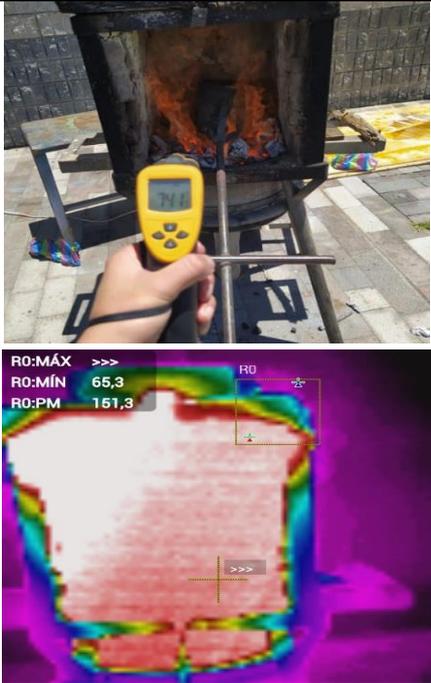
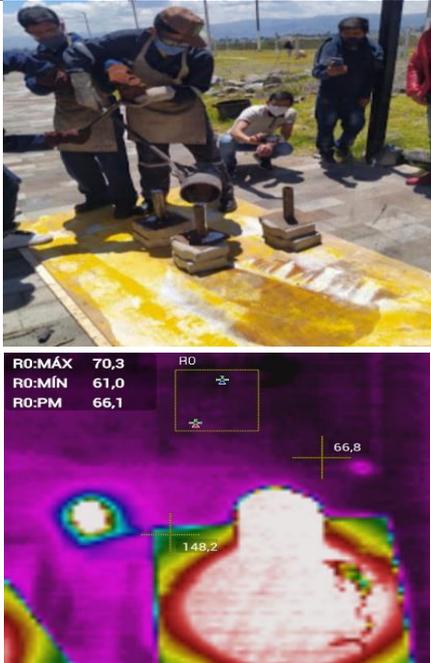
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
%PRIMERO CERRAMOS EL GUI
close autoria
%ABRIMOS EL GUI PRINCIPAL
fundza

```

## ANEXO 2. REGISTRO FOTOGRÁFICO

PROCESO DE FUNDICIÓN	
FOTOGRAFÍAS	OBSERVACIÓN
	<p>Se prepara todos los parámetros necesarios para la fundición en este caso se toma la temperatura de 13,9 °C.</p> <p>Se realiza el proceso de fundición de ½ kg de aluminio.</p> <p>Mediante la cámara termo gráfica se analiza el proceso de fundición de las condiciones iniciales de temperatura en el horno.</p>
	<p>Mediante el incremento de temperatura y la combustión del carbón y la alimentación de energía producida por el Blower se incrementa la temperatura en 257°C en aproximadamente 4 minutos</p>
	<p>El incremento de temperatura se visualiza en 524°C en un tiempo de 7 minutos</p>

	<p>En el proceso de fundición se observa el incremento de temperatura a un valor de 741°C en un tiempo de 11 minutos, teniendo en cuenta que el material a fundirse es el aluminio</p> <p>En el proceso se verifica el comportamiento de fundición mediante la cámara termo-gráfica indicando los valores altos de temperatura</p>
	<p>En el proceso de fundición de pasar de un estado sólido a un estado líquido se realiza en un tiempo estimado de 28 minutos, teniendo a eliminar la escoria y transportarlo a un moldé para la solidificación del aluminio.</p>
	<p>Finalmente termina el proceso de fundición en un tiempo de enfriamiento de 10 minutos a temperatura ambiente.</p>