

**Modelación y Simulación del Proceso de Fundición para el Zinc y Aluminio.
Modeling and Simulation of the Casting Process for Zinc and Aluminum.**

Miguel Alejandro Escobar Ruiz, José Williams Morales Cevallos, Cristian Paúl Chanaluisa Ayala, Jofre Darío Tituaña Tituaña, Luis Fernando Tierra Tingo, Romel Franklin Calero Durango, Daniel Carrion Espin

**CONFLUENCIA DE
INNOVACIONES CIENTÍFICAS**

Enero - junio, V°5-N°1; 2024

- ✓ **Recibido:** 19/02/2024
- ✓ **Aceptado:** 27/02/2024
- ✓ **Publicado:** 30/06/2024

PAIS

- Ecuador -Latacunga
- Ecuador - La Joya de los Sachas
- Ecuador - Quito

INSTITUCIÓN

- Ingeniería Profesional IP electric.
- Instituto Superior Tecnológico General Eloy Alfaro (ISTGEA)
- Ministerio de Educación
- Ministerio de Educación
- Instituto Superior Tecnológico General Eloy Alfaro (ISTGEA)
- Instituto Superior Tecnológico General Eloy Alfaro (ISTGEA)
- Universidad Politécnica Salesiana

CORREO:

- ✉ alejoescobar42@hotmail.com
- ✉ wmorales@institutos.gob.ec
- ✉ cristian.chanaluisa@educacion.gob.ec
- ✉ jofre.tituaña@educacion.gob.ec
- ✉ ltierra@institutos.gob.ec
- ✉ riscalero@institutos.gob.ec
- ✉ danicares@gmail.com

ORCID:

- 🌐 <https://orcid.org/0000-0003-0016-3451>
- 🌐 <https://orcid.org/0009-0009-5526-2909>
- 🌐 <https://orcid.org/0009-0003-2857-0662>
- 🌐 <https://orcid.org/0009-0004-2591-1350>
- 🌐 <https://orcid.org/0009-0000-8205-2450>
- 🌐 <https://orcid.org/0009-0000-4613-9903>
- 🌐 <https://orcid.org/0009-0008-0097-5357>

FORMATO DE CITA APA.

Escobar, M. Morales, J. Chanaluisa, C. Tituaña, J. Tierra, L. Calero, R. Carrion D. (2024). Modelación y Simulación del Proceso de Fundición para el Zinc y Aluminio. Revista G-ner@ndo, V°5 (N°1,). 394 – 409.

Resumen

La fundición de materiales se trata sobre el comportamiento de la termodinámica, para este caso se realiza el análisis en el desarrollo de fundición para el zinc (zn) y aluminio (al) se trata de componentes metálicos no ferromagnéticos los cuales dentro de un proceso de cambio de un estado sólido a líquido se tiende a tener propiedades dentro de los cuales proporciona una variedad de información contemplando desde su estructura de cambio y realizando el análisis en la detección de escoria, entre otros elementos que se producen en este cambio, para lo cual se detalla en el trabajo una estructura que permita garantizar el adecuado elementos que se produce en la fundición como lo es temperatura, presión, tiempo, variables fundamentales que determinan una retroalimentación correcta para el desarrollo en este proceso, mismo que se detalla resultados experimentales, mediante el que se realiza la modelación sobre este comportamiento teniendo en cuenta análisis estructurados como un análisis no lineal, análisis de transferencia de calor por convección, análisis de transferencia de calor por radiación, entre otros mismos que permiten la determinación de resultados y los algoritmos en la simulación encargados sobre la demostración en el comportamiento de este proceso arrojando datos que permiten una perspectiva tanto en la realidad como en simulación

Palabras clave: Fundición metales, comportamiento termodinámico, algoritmos.

Abstract

The smelting of materials is about the behavior of thermodynamics, for this case the analysis is carried out in the development of smelting for zinc (zn) and aluminum (al), these are non-ferromagnetic metallic components which within a process of change from a solid state to a liquid tends to have properties within which it provides a variety of information contemplating from its structure of change and performing the analysis in the detection of slag, among other elements that occur in this change, for which A structure is detailed in the work that allows guaranteeing the adequate elements that are produced in the foundry such as temperature, pressure, time, fundamental variables that determine a correct feedback for the development in this process, which also details experimental results, through the one that the modeling on this behavior is carried out taking into account structured analyzes such as an analysis n or linear, analysis of heat transfer by convection, analysis of heat transfer by radiation, among others that allow the determination of results and the algorithms in the simulation in charge of the demonstration of the behavior of this process, yielding data that allow a perspective both in reality and in simulation.

Keywords: metal casting, thermodynamic behavior, algorithms.

Introducción

El estudio actual tiene relación de manera matemática y computacional con el comportamiento térmico que involucra el proceso de fundición de los metales que son el aluminio y el zinc. Mediante el uso de herramientas computacionales se definió este tipo de comportamiento y procesos de fundición mencionados, (Presas, 2013 – 2014). Esta herramienta denominada MATLAB mantiene una interfaz gráfica de usuario GUIDE del programa antes mencionado. Uno de los métodos que se utilizó en la investigación fue de tipo Extreme Programming (XP), en donde se centró principalmente en cinco dimensiones que son: recopilación de las especificaciones del horno de fundición, identificación de las variables en sistema lineal, modelo matemático con sus tres tipos de análisis (preprocesado, procesado y postprocesado), simulación del modelo matemático en la herramienta computacional mencionada y el análisis de los resultados; cabe destacar que cada etapa tuvo su algoritmo, iteración y depuración, (Pérez & Soto, 2019).

Detallando el tratamiento térmico del zinc y del aluminio para alcanzar su punto de fusión, este se basa en un precalentamiento inicial del horno que se va a utilizar, su fuente calorífica puede ser a través de electricidad como son las resistencias calefactoras, mediante gas licuado de petróleo como son los quemadores industriales o mediante el uso de carbón vegetal, (Rozas, 2010). Posteriormente se ingresan los metales de interés y en un determinado tiempo se puede observar el comportamiento de los mismos, esto indica un cambio de fase de estado sólido a estado líquido. Este proceso térmico es la razón de estudio de esta investigación con la finalidad de entender su comportamiento, (Casanova, 2023).

Materiales Y Métodos

La fundición de metales es un proceso térmico muy utilizado en el campo de la metalurgia, se emplea para moldear una gran cantidad de objetos que pueden ser usados para la vida diaria, esto hace mención desde artículos domésticos hasta la industria en general. Actualmente se han desarrollado varias investigaciones en el desarrollo de nuevos materiales y

tecnificar este proceso con el objetivo de tener una mejor resistencia, alta durabilidad y por ende mayor eficiencia.

Existen varios métodos de fundición de metales, su selección depende de algunos factores como propiedades mecánicas, geometría, costos en producción, entre otros. Estos métodos utilizan distintos tipos de equipos industriales, instrumentos, herramientas y recursos económicos que conllevan a un impacto del costo total en producción.

Modelos Matemáticos

Es importante conocer el comportamiento que tiene un sistema con la finalidad de controlarlo, esto es posible mediante el uso de modelos matemáticos, este comportamiento se lo determina a través de ecuaciones, de tal manera que se observe como el conjunto de procesos actúa sobre los distintos fenómenos físicos, biológicos, económicos, entre otros.

Existen dos tipos de modelos matemáticos, el primero es el modelo estático en donde menciona que las variables que inciden dentro del proceso son constantes en cualquier momento y que el tiempo tiene interferencia con la respuesta. Por otra parte, se tiene el segundo modelo denominado dinámico, el cual indica que las variables dentro de un proceso tienen ligeros o grandes cambios con respecto al tiempo. Cabe recalcar que este análisis investigativo tiene por objetivo analizar su comportamiento.

Para realizar el control de cualquier tipo de sistema es necesario conocer que es lo que se desea ejecutar, conocer las variables y determinarlas en función de entrada y salida. En los sistemas de control existen en lazo abierto y en lazo cerrado, en esta oportunidad se tendrá un enfoque inclinado hacia la parte del control utilizando retroalimentación, es decir lazo cerrado, en donde se relaciona la variable de salida con la variable de entrada y se indica una referencia que viene a ser el resultado que disminuye o aumenta (dependiendo de lo requerido) al ciclo del sistema, cabe recalcar que esta operación lo realiza el bloque de comparador.

Si este comparador no está presente en el sistema, la variable de salida no tiene influencia alguna en el control, es decir no se puede desarrollar una 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.

Métodos para el cálculo

Una vez conociendo la teoría de la modelación matemática, se puede determinar el diseño en base a las especificaciones técnicas que presenta el horno industrial, así como también es necesario conocer las constantes y las variables de todo este sistema que conlleva a la simulación del proceso de fundición del zinc y del aluminio, estas condiciones tienen que parecerse lo más cercano a la realidad, para ello el software de simulación que se seleccione juega un papel esencial en la validación de los resultados.

Posteriormente se aplican las diferentes leyes fundamentación que tienen relación con los procesos térmicos y mecánicos para obtener las distintas ecuaciones que determinarán el comportamiento de todo el proceso mencionado.

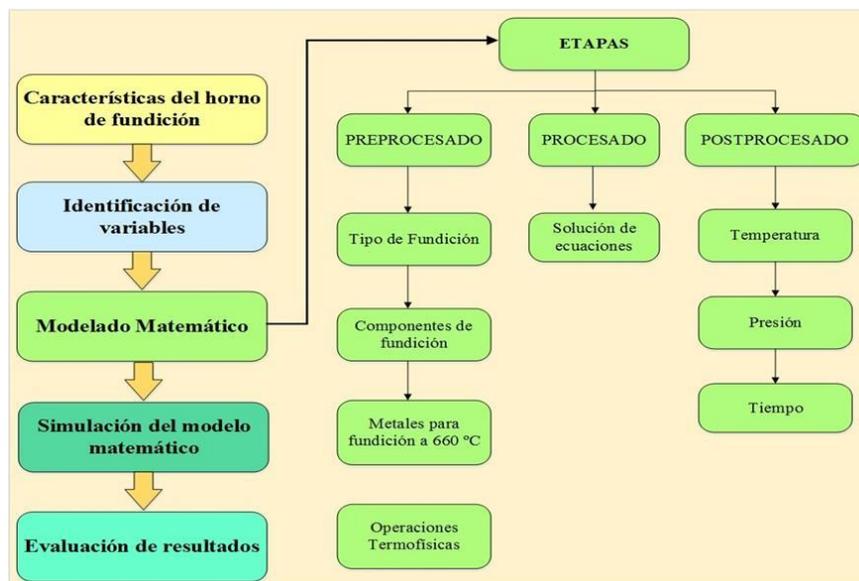


Figura 1. Metodología

La ecuación que predomina dentro del sistema térmico para el modelo matemático se muestra en la tabla 1.

ECUACIÓN
$H = \rho * V Cs * (Tm - To) + Hf + Ct * (Tp - Tm) $ <p>H = Calor requerido para elevar la temperatura del metal a la temperatura de fusión ρ = Densidad, (Kg/m^3) V = Volumen del metal que se calienta, (m^3) Cs = Calor específico del material sólido, ($J/Kg^{\circ}C$) Tm = Temperatura de fusión del metal, ($^{\circ}C$) To = Temperatura inicial, generalmente la ambiente, ($^{\circ}C$) Hf = Calor de fusión, (J/Kg) Cf = Calor específico en peso del metal líquido, ($J/Kg^{\circ}C$) Tp = Temperatura de vaciado, ($^{\circ}C$) Tp = Temperatura de vaciado, ($^{\circ}C$)</p>

Tabla 1. Ecuación para el cálculo numérico

Modelo no lineal

La energía que se obtiene a través de la red de suministro está representada por la ecuación:

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

Esta potencia eléctrica se da mediante el traslado del flujo térmico utilizado para el calentamiento de las resistencias y los flujos térmicos por radiación y convección como se expresa en la ecuación siguiente:

$$P = Q_a + Q_{rad} + Q_{conv}$$

Estudio de la transferencia de calor por convección.

La ecuación de transferencia de calor por convección está dada por (3):

$$Q_{CONV} = \alpha_r * (S_r) * (T_r - T_a)$$

Estudio de la transferencia de calor por radiación.

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

Resistencia calorífica

Una de las fuentes de generación de calor más utilizadas en los procesos térmicos es mediante el uso de la electricidad, este fenómeno utiliza el espectro electromagnético en forma de onda para cambiar el estado de temperatura de una región. Uno de los elementos más comunes son las resistencias eléctricas calefactoras que mediante el flujo de corriente que atraviesa sobre ella se produce una radiación infrarroja que tiende a elevar la temperatura de su entorno.

$$Pe = I^2R$$

Donde:

$$I = \text{Corriente en Amperio}$$

Análisis de Resultados

Como primeros resultados se destaca que se utilizó una cantidad de 8 kg de aluminio (carga máxima de diseño del horno) para realizar el proceso de fundición, en donde se obtuvieron curvas específicas como son temperatura – tiempo y la curva de consumo, en donde se visualiza las variaciones de temperatura el consumo de energía calorífica durante este proceso mencionado. La tabla 2 a continuación muestra valores de temperatura en función del tiempo del aluminio.

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

Tabla 2. Temperatura y tiempo fundición del aluminio

En la figura 2 se observa la curva que relaciona la temperatura y el tiempo ejecutado en el proceso de fundición del aluminio.

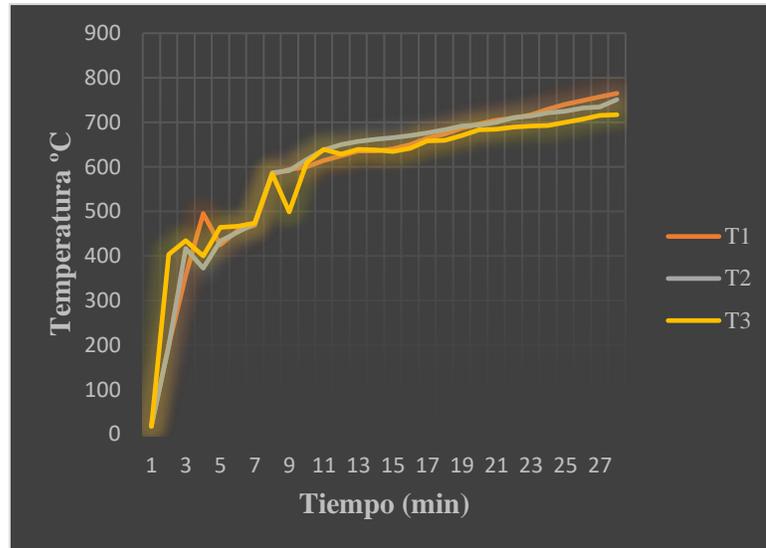


Figura 2. Temperatura versus el tiempo fundición del aluminio

La figura 3 presenta una curva del comportamiento de la temperatura promedio en función del tiempo obtenida del proceso de fundición del aluminio.

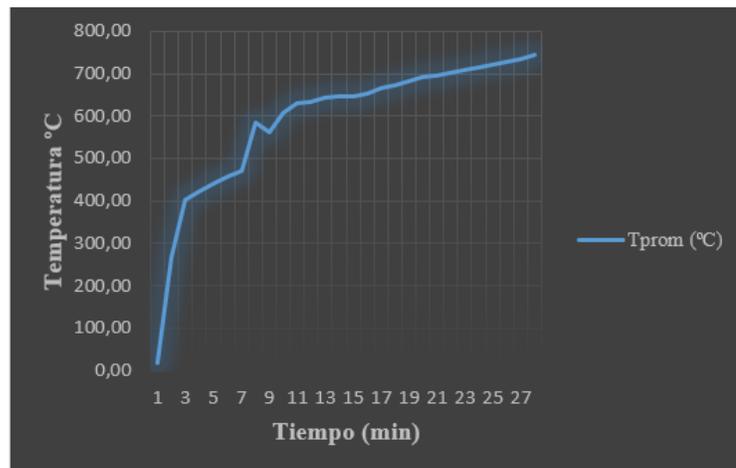


Figura 3. Temperatura promedio versus el tiempo fundición del aluminio

La tabla 3. A continuación se muestra valores de temperatura y tiempo en la fundición del zinc.

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

Tabla 3. Temperatura y tiempo fundición del zinc

En la figura 4 se observa la gráfica de la temperatura en función del tiempo para el proceso de fundición del zinc

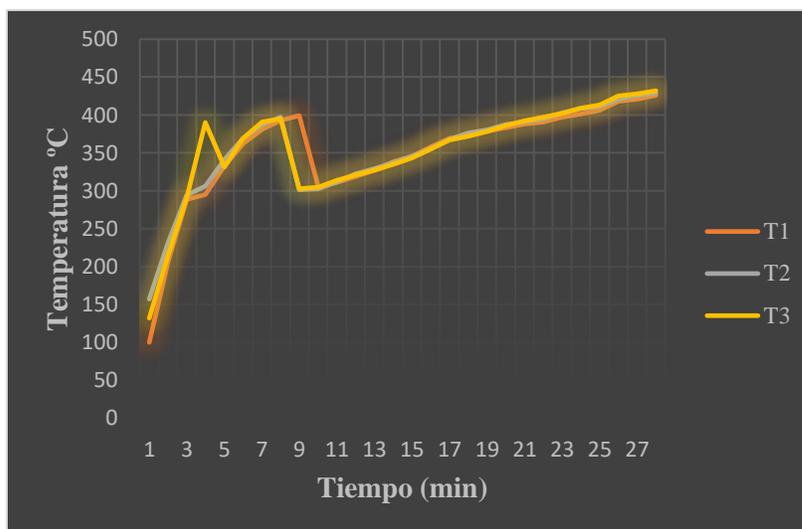


Figura 4. Temperatura versus el tiempo fundición del zinc

Mientras que en la figura 5. Se presenta la gráfica de la temperatura promedio en función del tiempo para el proceso de fundición del zinc.

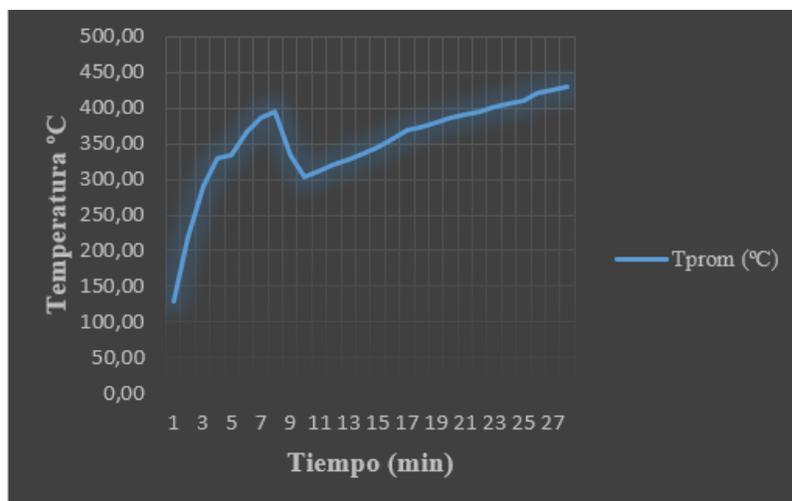


Figura 5. Temperatura promedio versus el tiempo fundición del zinc

En la tabla 4. Se puede observar la cantidad de material de aluminio en “kg” que fue utilizada para cumplir el proceso de fundición.

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

Tabla 4. Cantidad en kg del metal aluminio

La figura 6 indica las porciones en “kg” de aluminio utilizados para cumplir con el proceso de fundición.

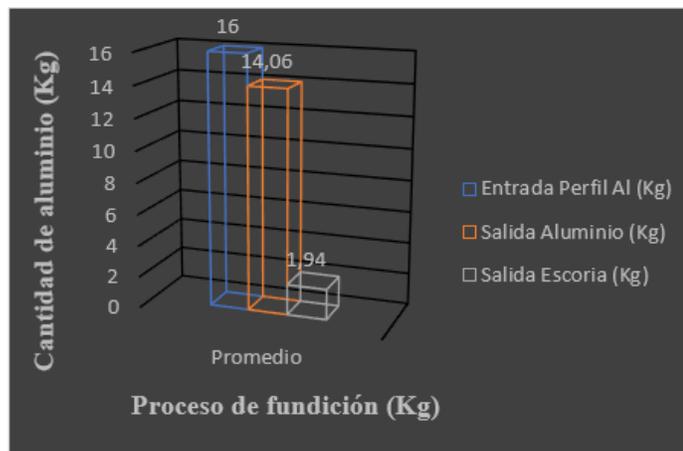


Figura 6: Porciones de aluminio en “kg”

En la tabla 5. Se puede observar las porciones de material de zinc en “kg” que fueron utilizadas para cumplir el proceso de fundición.

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

Tabla 5. Cantidad en kg del metal zinc

La figura 7 indica las porciones en “kg” de zinc utilizados para cumplir con el proceso de fundición.

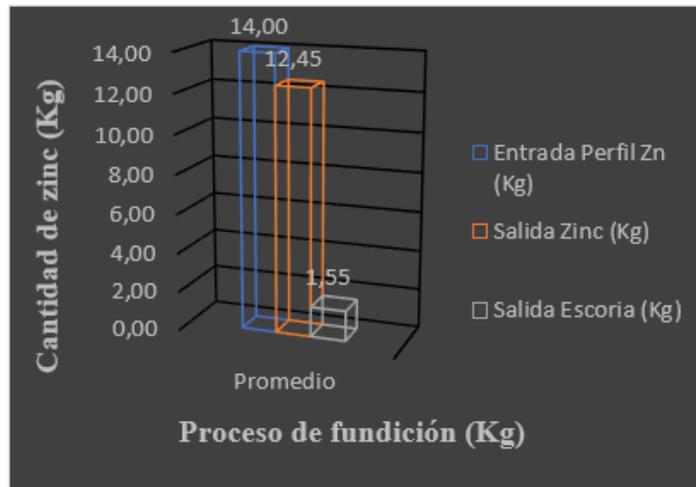


Figura 7. Cantidad en kg del metal zinc.

Validación simuladora

Para este caso se realiza el proceso de validación del modelo matemático y las pruebas experimentales realizadas, teniendo como resultado valores casi similares determinado así el correcto análisis y determinación de este proceso termodinámico. En la tabla 6, se detalla el proceso de resultado en la aplicación del software Matlab.

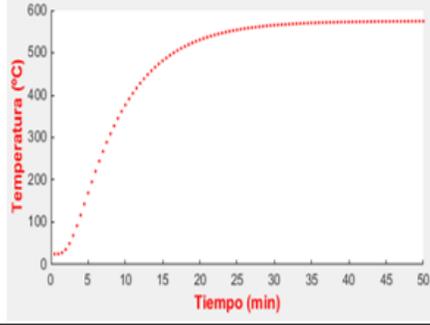
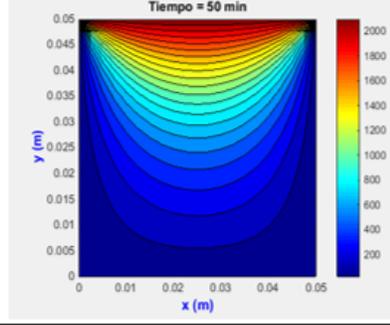
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Observación
27		
<p>En este caso en el proceso de simulación se realiza con un tiempo estimado de 27 min de fundición para el aluminio llega a fundir el metal a una temperatura aproximada de 570 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurre en un tiempo 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>		

Tabla 6. Comportamiento del proceso de fundición del aluminio

En la tabla 7. Se presenta a continuación la simulación del proceso de fundición del zinc.

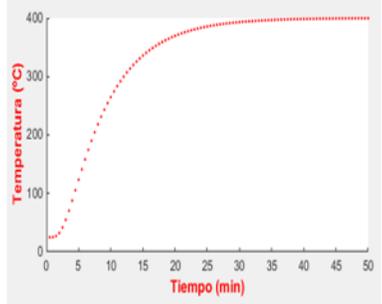
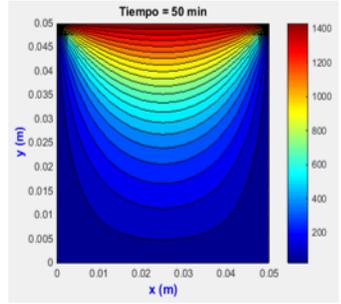
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Observación
25		
<p>En lo que respecta al zinc; en un tiempo de 25 minutos el simulador de horno de fundición llega a fundir el zinc a una temperatura aproximada de 387 °C. El proceso en el que cambia de estado sólido a líquido ocurre en un tiempo aproximado de 20 minutos 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.</p>		

Tabla 7. Comportamiento del proceso de fundición del zinc

Conclusiones

Se desarrolló la validación de los datos experimentales en comparación con los datos simulados, en donde se puede indicar que existe una diferencia de 0,9 % entre el aluminio vs el zinc para el proceso de pre-calentamiento, por otra parte, dentro del proceso para alcanzar su temperatura de fusión existe una diferencia de 0,8 % entre el aluminio vs el zinc, esto menciona que el modelo estudiado presenta grandes similitudes con el horno industrial de prueba.

Mediante el uso del modelo matemático se demostró la validez que tuvo el balance de masa de los dos tipos de metales (aluminio y zinc) enfocados a un modelo de horno resistivo, a pesar de no tener variaciones químicas dentro de los procesos de fundición, se destaca que todo el metal que ingresa en estado sólido es convertido en su totalidad en estado líquido manteniendo en un equilibrio las masas de los metales, cabe recalcar que los procesos fueron dos: pre-calentamiento y punto de fusión.

El análisis que se desarrolló de la simulación del proceso de fundición del aluminio y el zinc presenta su grado de validación a pesar de que se pueden integrar y/o generar nuevas investigaciones que tienen relación con las impurezas que se presentan al momento del cambio de fase y como éstas alteran el desempeño del sistema. Es considerable simular estos transitorios precisamente en la colada del metal, permitiendo reforzar y mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto medio ambiental.

Referencias bibliografica

- Chmid, S. K., & Kalpakjian, S. (xxxx). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (4th ed., pp. 125-136). Editorial.
- Gerling, H. (1979). *Moldeo y conformación*. Editorial Reverté, S.A.
- Street, R. L. (1996). *Elementary Fluid Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc.
- Incropera, F. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Prentice Hall.
- Çengel, Y. A. (2003). *Termodinámica*. McGraw Hill.
- Bazzana, S., Hegoburu, P., Ordoñez, M., & Pieck, D. (2008). *Hornos y tratamientos Térmicos. Materiales y Combustibles Nucleares*.
- Cangás, J., & Valverde, E. (2014). *Estudio del proceso de solidificación en fundición de aluminio para brazos del sistema de freno de un ascensor, mediante elementos finitos*. Escuela Politécnica Nacional.
- Posadas, H. (2012). *Optimización de un sistema de alimentación para la producción de cabezas de aluminio por el proceso de gravedad*. Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Rojas, L. T., De La Torre, Y., Vidal, J. R., & Ciro Quispe, E. (2020). *Revisión energética en una empresa de fundición de metales*. *Desarrollos Latinoamericanos en Ingeniería Energética*, 1(1), 55–63. Enlace
- De Bilbao Curso ETSI. (s.f.). *Simulación numérica de procesos de fundición*. Recuperado de enlace
- Jesús Casanova JVRT. (2013). *PFC: Simulación de fundición por ordenador mediante QuikCAST*. Recuperado de enlace
- Edelpdesenfdeapbdelsdef, Finitos ME. (s.f.). Recuperado de enlace
- Mmplaodecdetdecena. (s.f.). Recuperado de enlace
- Finite Solutions. (2017). *SolidCast training course workbook*. Finite Solutions Incorporated.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Editorial Pearson.
- Ogata, K. (1987). *Dinámica de sistemas*. Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Campbell, J. (1991). *Castings*. Butterworth-Heinemann.
- Rozas, G. J. (2010). *Design and fabrication of a magnesium alloy casting campaign*. Proyecto Fin De Carrera, pp.23-33.
- Presas, M. M. (2013-2014). *Microestructura y propiedades mecánicas del SiC biomórfico*. Universidad.
-

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.