

**Universidad de Zaragoza
Máster en Energías renovables y
Eficiencia Energética**

**Programa Oficial de Posgrado en
Ingeniería**

Trabajo Fin de Máster

**Modelado de un horno de fundición
de aluminio mediante plasma**

Autor

Luis Enrique Acevedo Galicia

Director

Segio Usón Gil

Co-Director

Javier Uche Marcuello

Zaragoza, Agosto 2011

Resumen

Modelado de un horno de fundición de aluminio mediante plasma

El objetivo del proyecto es realizar una simulación numérica de un proceso de fundición de aluminio con dos tecnologías distintas (combustión de gas propano e ionización de gas nitrógeno, plasma) para realizar una comparación de los consumos energéticos obtenidos, proporcionar criterios de optimización de los procesos y reducir el número de pruebas físicas, que al mismo tiempo implica la reducción de costes de operación en etapa de pruebas.

Se emplea un modelo de transferencia de calor unidimensional con el que se simulan las características térmicas de un horno de fundición de aluminio mediante combustión de gas propano y con una antorcha de plasma. El modelo empleado simula la cámara de combustión, el comportamiento del plasma, y la conducción de calor transitoria de las paredes del horno, así como la carga metálica a fundir. Las ecuaciones se resuelven numéricamente mediante *scripts* (guiones) realizados en *MATLAB*. El modelo matemático distingue entre dos tipos de horno: horno cilíndrico de gas y horno cilíndrico de plasma. La simulación térmica del horno, tras la fusión del aluminio, tiene como salida el perfil de temperatura que se obtiene en paredes, techo y metal, también arroja resultados sobre la energía consumida, los tiempos de operación del horno, así como los balances de energía y exergía, que permite evaluar las pérdidas de calidad de la energía.

Con esta simulación se comprueba que un sistema de fundición de aluminio mediante la aplicación de plasma es más eficiente que un sistema convencional de gas. Un horno convencional consume 52.6% más que un horno de plasma. Se encontró una diferencia en eficiencia de 10%. La investigación demuestra que tecnologías como el plasma tienen una gran aplicación en el campo de la ingeniería y, que con los análisis energético y exergético, se pueden asegurar la sostenibilidad de dichas tecnologías con respecto al consumo de energía.

Abstract
Model of an aluminum melting furnace with plasma

The main objective of the project is to perform a numerical simulation of the melting process of two different technologies (gas combustion and ionization of nitrogen, plasma) to compare the power consumption, provide optimization criteria and to reduce the physical tests, that at the same time implies the reduction of costs in testing stage of the project.

A one-dimensional heat transfer model is used to simulate the thermal characteristics of the aluminum melting furnace operating with gas burner and with plasma torch. The model simulates the combustion chamber, the behavior of the plasma, the transient heat conduction in the furnace walls and the metal during melting. The equations are solved numerically with MATLAB scripts. The mathematical model perceives between two kind of furnaces: cylindrical gas furnace and cylindrical plasma furnace. The thermal simulation of the furnace, after aluminum casting, shows the temperature profile of the furnace walls, roof and metal, it also shows the energy and exergy balances, which allow the evaluation of quality lost of energy.

With this simulation it is proved that a plasma melting system is more efficient than a conventional gas melting system. A conventional furnace consumption is 52.6% greater than a plasma furnace. It was found a difference in efficiency of 10%. The investigation demonstrates that technologies like plasma could have a great application in the engineering field and, that with energy and exergy analysis it is possible to assure the sustainability of this technologies with respect to the energy consumption.

Contenido

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas	4
1 Introducción	5
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Descripción General de la Simulación	8
1.3 Descripción general del sistema de plasma	10
1.4 Eficiencia	12
2 Simulación numérica del horno	13
2.1 Prealentamiento con combustión de gas	13
2.2 Simulación de la fusión del aluminio	16
2.2.1 Fusión del aluminio con combustión de gas propano . .	17
2.2.2 Fusión del aluminio con plasma	18
2.3 Balance de exergía en el horno de fundición de aluminio	20
3 Validación de los resultados	22
4 Resultados del modelo	24
4.1 Datos iniciales de la simulación	24
4.2 Resultados del análisis de transferencia de calor	25
4.3 Resultados del cálculo exergético	29
4.4 Influencia del material refractario	30
5 Conclusiones	32
Bibliografía	36
A Descripción de modelos matemáticos	40
A.1 Radiación, emisión y absorción la combustión y el plasma . . .	40
A.1.1 Formulación numérica de radiación por absorción y transmisión	41
A.2 Modelo de la transferencia de calor total en el horno	43
A.3 Cálculo del perfil de temperaturas	45

A.4	Simulación de la energía del plasma	48
A.4.1	Análisis en el cátodo	50
A.4.2	Ecuación de Elenbaas-Heller	52
A.4.3	Modelo de Steenbeck	54
A.4.4	Modelo de Raizer	56
A.4.5	Modelo de la transferencia de calor del plasma	58
A.5	Resistencia eléctrica	61
B	Código de Matlab	62
B.1	Gases de combustión	62
B.2	Factores de forma	63
B.3	Radiación y convección	64
B.4	Calentamiento del refractario	66
B.5	Resistencia eléctrica	69
B.6	Fusión del aluminio	69
B.7	Exergía del aluminio	73
C	Ánalisis Exergético	74
C.0.1	Exergía del plasma	75
C.1	Exergía de la radiación	76
C.1.1	Exergía de un cuerpo negro	76
C.2	Cálculo de las exergías	79

Índice de Figuras

1	Prototipo de horno para fundir aluminio	8
2	Arquitectura general de la simulación	10
3	Principales arcos de plasma térmico	11
4	Arquitectura de la simulación, precalentamiento	13
5	Transferencia de calor durante el precalentamiento	15
6	Configuración de los nodos de temperatura en el aluminio . . .	16
7	Arquitectura de la simulación de fusión con gas	17
8	Arquitectura de la simulación de fusión con plasma	18
9	Nivel de agregación del horno durante el precalentamiento . .	21
10	Nivel de agregación del horno durante la fusión	22
11	Perfil de temperatura de horno cúbico, 1	23
12	Perfil de temperatura de horno cúbico, 2	23
13	Validación del algoritmo de simulación del plasma	24
14	Perfil de temperatura al final el precalentamiento	27
15	Variación de la temperatura en precalentamiento	27
16	Proceso de fundición del aluminio	28
17	Perfil de temperaturas del refractario después de la fusión . .	28
18	Exergía del aluminio durante todo el proceso de fundición . .	30
19	gráfica paramétrica de emisividad	31
20	gráfica paramétrica de capacidad calorífica	32
21	Análisis del perfil de temperatura en el horno	46
22	Transferencia de calor en el sistema con plasma, 1	49
23	Transferencia de calor en el sistema con plasma, 2	49
24	Diagrama de potencial de distancia	50
25	Modelo de Steenbeck	54
26	Vector de velocidad	59
27	Exergía de la transferencia de calor	77

Índice de Tablas

1	Datos de entrada de la simulación	25
2	Resultados de la simulación, precalentamiento	25
3	Resultados de la simulación, fusión y totales	26
4	Análisis exergético del horno de aluminio	29
5	Composición del combustible en porcentaje	79
6	Peso atómico de los elementos en el combustible	80
7	Composición atómica del combustible	80
8	Energía de elementos químicos y substancias en el AR	81
9	Factor de conversión de base molar a másica	81
10	Potencial químico de los elementos en el combustible	82
11	Exegía del combustible	83

1 Introducción

1.1 Descripción del problema

El aluminio es un elemento químico, de símbolo *Al* y número atómico 13. Se trata de un metal no ferromagnético. Es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Los compuestos de aluminio forman el 8% de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales. En estado natural se encuentra en muchos silicatos (sales minerales de ácido silícico que forman rocas) [1]. El aluminio únicamente se extrae del mineral conocido con el nombre de bauxita, primero se transforma en alúmina mediante el proceso Bayer, patentado por el austriaco Karl Bayer en 1889 y basado en la disolución de la bauxita con hidróxido sódico. Este proceso se fue imponiendo hasta convertirse, a partir de 1860, en la única fuente industrial de alúmina y por tanto de aluminio en el mundo.

Su industria nació 26 años después, en 1886. En ese año, de manera independiente, en Estados Unidos y en Francia, Charles Martin Hall y Paul Heroult respectivamente descubrieron una manera económica y viable para producir aluminio por medio de electrolisis [2]. A partir de ese momento la industria del aluminio tuvo un enorme crecimiento, creando una gran dependencia entre energía y aluminio, desplazando a algunos materiales como el cobre, plomo y estaño. Finalmente, se convirtió en el segundo metal más utilizado después del acero.

La fundición fue el primer mercado importante del aluminio, seguido de la comercialización del método electrolítico de reducción. Al principio, las aplicaciones estuvieron limitadas a adornos como números de casas, espejos de mano, peines, cepillos, broches de corbata, alfileres y lámparas decorativas que enfatizaban lo ligero que es el material. La fundición del aluminio sustituyó al hierro en utensilios de cocina, ollas, sartenes y calderas. El costo del aluminio descendió poco a poco y para el final del siglo XIX, muchas aplicaciones del aluminio en ingeniería se hicieron económicamente viables [3]. La excelente combinación de bajo peso, alta resistencia mecánica y a la corrosión, además de los costos bajos de producción permitieron al aluminio y sus aleaciones colocarse como uno de los grupos metálicos más comúnmente usados [4]. Sustituir materiales pesados, por materiales ligeros

ha sido una práctica común en la industria aeroespacial, actualmente esta actividad también es llevada a cabo en la manufactura de automóviles, camiones, vehículos militares, edificios y equipo para construcción, lo que abre varias líneas de investigación en producción y manufactura del material.

Hasta este momento la manera de producir aluminio de su óxido, alúmina, se mantiene, sin embargo el crecimiento de la industria ha traído grandes cambios en la escala de producción lo que ha repercutido en el consumo energético. La producción de aluminio es de alto consumo energético; todo el proceso de obtención requiere aproximadamente $15 [MWh]$ por tonelada métrica de aluminio. La industria del aluminio es una de las más grandes consumidoras de energía, tiene un consumo directo de $6.5 \cdot 10^9 [kWh/año]$, y se coloca en el séptimo lugar de consumo energético después de la industria química, refinerías de petróleo, producción de hierro y acero, comida y bebida y minería. En términos de intensidad de energética (energía utilizada por tonelada de producto), la industria del aluminio se coloca en el quinto lugar, solamente la industria del papel, la gasolina, hierro y acero, así como las industrias de manufactura de etileno tienen una intensidad energética mayor [5]. El punto de fusión del aluminio es bajo, cuando se compara con el de los metales más comunes como el hierro, cobre, latón, magnesio y zinc, etc. De hecho, la temperatura en la que se funde el aluminio es de $660.37 [°C]$. Dicho anteriormente, el consumo de energía primaria en producción de aluminio es de alrededor de $15 [MWh/ton]$, de los cuales 5.5% se consume en fundición. Por otro lado, el consumo de energía promedio para producir aluminio secundario es alrededor del 6% del requerido para el primario [6].

Los hornos industriales son recintos aislados diseñados para proporcionar energía a una carga con diferentes fines de tratamiento térmico. La fundición de metales no ferrosos requiere temperaturas altas (en hornos de fundición de aluminio se alcanzan entre 920 y $1030 [K]$), y en algunas ocasiones se involucran procesos de erosión y corrosión en las instalaciones [7]. El mayor problema encontrado durante la fundición de aluminio en hornos convencionales es la formación de óxidos y absorción de hidrógeno, ambas cosas pueden afectar seriamente la calidad del producto causando inclusiones de óxidos o muy alta porosidad [8]. Los hornos convencionales que se utilizan para fundir metales, como el horno de arco eléctrico, el alto horno, el de inducción y horno de crisol, consumen gran cantidad de energía. Los hornos de fusión que se utilizan actualmente en la industria del aluminio

normalmente se pueden clasificar en tres tipos: hornos de calentamiento con resistencias eléctricas, hornos por inducción, y los hornos de combustión [9].

La creciente limitación en materias primas para procesos metalúrgicos y los serios problemas ecológicos involucrados requieren mantener en mente no sólo los procesos de fundición basados en plasma, sino también en el tipo de materia prima a procesar y el producto a obtener. Por ejemplo, se ha demostrado que en el procesamiento del acero se puede reducir el consumo de coque de petróleo de $470 [kg/t]$ a $385 [kg/t]$. Éstos cálculos muestran que el desarrollo de nuevas tecnologías en cuestión de materias primas, energía y ecología tiene un sustento económico más sólido que el reestructurar las tecnologías actuales [10]. Por ejemplo, Dennis Lee en su tesis doctoral [11] muestra que un sistema de fundición de aluminio convencional, mejorado con un sistema de precalentamiento y recirculación de gases, disminuye el consumo de combustible 38%, mientras que en este trabajo se demuestra que la disminución en consumos energéticos mediante plasma se encuentra alrededor del 45%, lo que implica menos pérdidas energéticas, menos destrucción de exergía y menor producción de residuos contaminantes. La mayoría de las emisiones en el proceso de fusión proceden de la combustión de los combustibles utilizados en hornos. De hecho, la mejora de la eficiencia energética y la reducción de emisiones contaminantes en los sistemas de combustión son las principales preocupaciones para los hornos de fusión de aluminio. Con este fin, en los últimos años se han planteado diseños de nuevos hornos basados en tecnologías avanzadas de transferencia de calor. Uno de los diseños más prometedores es el de la antorcha de plasma, una tecnología de transferencia de calor que se está explorando con el objetivo de conocer la factibilidad de su aplicación, desde el punto de vista técnico, medioambiental y económico [12]. Los hornos basados en tecnología de plasma, además de tener mayor eficiencia, evitan los problemas anteriores, ya que no se introduce hidrógeno (de combustible fósil).

El objetivo del proyecto es realizar una simulación numérica de un proceso de fundición de aluminio con dos tecnologías distintas (combustión de gas propano e ionización de gas nitrógeno, plasma) para realizar una comparación de los consumos energéticos obtenidos, proporcionar criterios de optimización de los procesos y reducir el número de pruebas físicas, que al mismo tiempo implica la reducción de costes de operación en etapa de pruebas.

1.2 Descripción General de la Simulación

Los programas de simulación han sido diseñados para simular el comportamiento de un horno cilíndrico tal y como lo muestra la siguiente figura.

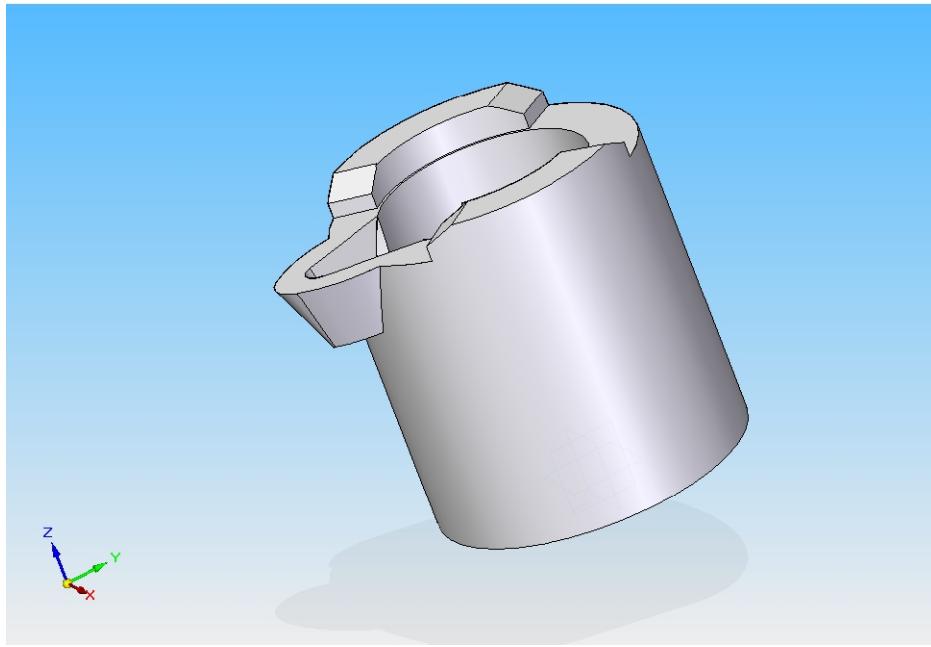


Figura 1: Prototipo de horno para fundir aluminio

El objetivo principal de esta simulación es predecir el funcionamiento de un horno de fundición, así como la posibilidad de obtener perfiles de temperatura, que en la práctica son difíciles de medir, además del alto coste de las pruebas físicas. Ya se han realizado simulaciones de este tipo de hornos, [13], [11], [14], sin embargo todos ellos se basan en métodos convencionales de generación de calor para sus cálculos. En esta investigación, además de abordar los métodos convencionales, se hace el análisis de un sistema de generación de calor mediante plasma.

El método, además de ser novedoso pretende ahorrar energía y producir menos contaminantes; para su implementación es necesario conocer su comportamiento y para ello existen dos líneas de investigación: la experimentación y la simulación. Mientras la experimentación produce resultados de referencia, que pueden considerarse exactos (dependiendo del equipo de

medición), la simulación reproduce el comportamiento de manera numérica y obtiene resultados muy cercanos a los medidos. La simulación tiene la capacidad de mostrar resultados cuantitativos y cualitativos en cuestión de consumos de energías, permite hacer una análisis de eficiencia y da la posibilidad de mejorar el sistema al simular varios tipos de refractarios y tamaños del horno, un hecho que en la parte experimental implicaría una inversión muy grande.

Para realizar la simulación se crearon librerías con datos de varios refractarios (Tri-mor plascast, Tri-mor midcast, Trimor coolcast, Alumina, Fused alumina, Magnesia y Sílice). Además que, de ser necesario, la simulación permite definir un nuevo material con sólo teclear las propiedades del mismo. Esto permite realizar un análisis de sensibilidad con respecto al material utilizado como refractario.

La simulación comienza con el precalentamiento del horno, que sirve para evitar el choque térmico del refractario debido a la diferencia de temperaturas entre las paredes, el plasma y el aluminio (cabe señalar que en los experimentos el precalentamiento se lleva acabo sólo una vez antes de todas la pruebas, pero en la simulación cada prueba se toma independiente con su propio precalentamiento). Para esto se calculan las propiedades de la combustión de propano, además de los factores de forma (cálculo de la transferencia de calor por radiación, apéndice A.1 y A.2), convección y perfiles de temperatura.

Después se simula el calentamiento y posterior fusión del aluminio, para ello se cuenta con dos simulaciones distintas: simulación de la fusión asistida con plasma y con combustión de gas propano. De ambas simulaciones se obtiene la energía consumida, exergía destruida, eficiencia y gráficas del proceso a lo largo del tiempo (estado transitorio). Finalmente se realiza de manera automática una comparación entre ambos procesos. Cabe señalar que existe una resistencia eléctrica (Apéndice A.5) que puede ser activada o no durante ambos procesos, precalentamiento y fusión, con el fin de mejorar la eficiencia global del sistema. Lo anterior se muestra de manera gráfica en la siguiente figura.

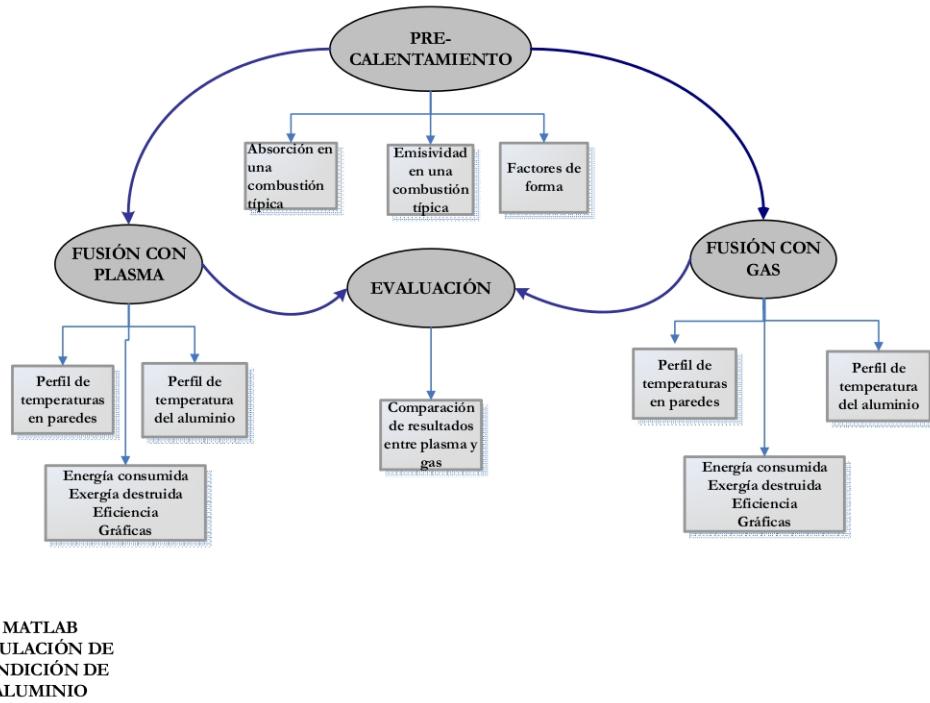


Figura 2: Arquitectura general de la simulación, comparación de la fusión de aluminio con plasma y con combustión de gas

Del proceso de simulación se obtiene un perfil de temperaturas en la pared del horno. Se modelaron seis puntos internos en la pared y se calculó la temperatura de cada uno de ellos durante todo el precalentamiento y la fusión del aluminio (Apéndice A.3). El análisis de exergía muestra una idea clara de cómo cambia la calidad energética durante el proceso completo, de aquí se puede obtener una optimización más acertada, al poner atención en los lugares con mayor destrucción de exergía.

1.3 Descripción general del sistema de plasma

El plasma térmico es una mezcla de iones, electrones y partículas neutras [15]. Se forma por la ionización de un gas mediante la creación de un arco

eléctrico sostenido entre un cátodo y un ánodo de la antorcha de plasma: las moléculas del gas son forzadas a colisionar con electrones cargados y esto crea partículas de gas con carga. Cuando se forman suficientes partículas con carga, positivas y negativas, el gas se convierte en conductor de electricidad. Las partículas cargadas también colisionan entre sí generando calor y provocando un arco de luz llamado plasma. La energía dada por la electricidad es capturada por los electrones y transferida a las partículas más pesadas (iones, átomos y moléculas) mediante colisión elástica (la energía cinética después de la colisión es igual a la energía cinética que tenían todas las partículas antes de la colisión). El gas es proyectado a gran velocidad como resultado de la alta densidad del campo eléctrico creando un chorro de plasma. Las instalaciones de plasma térmico funcionan con una fuente de energía eléctrica en corriente continua y se pueden dividir en dos categorías: arco transferido y no transferido [16]. Ambos consisten en:

1. Un cátodo, donde se emiten electrones.
2. Un sistema de inyección de gas.
3. Boquilla que confina el plasma.

Estos sistemas se muestran en la figura 3. En un sistema de arco no transferido, la boquilla que está polarizada de manera positiva y actúa como ánodo, mientras que en el arco transferido, el material a tratar (en este caso el aluminio a fundir) es el ánodo; no hay una boquilla física, aunque el plasma se forma y estabiliza entre el cátodo y el metal a fundir.

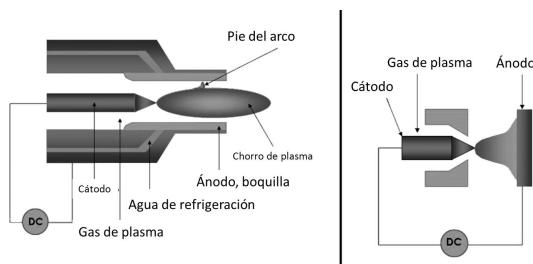


Figura 3: Principales arcos de plasma: arco no transferido (izquierda), arco transferido (derecha) [16]

En el sistema de estudio, se utiliza un arco transferido. Dicho con anterioridad, el arco se forma entre un cátodo y un ánodo. En este caso el aluminio actúa como ánodo, por lo que es muy importante que siempre exista contacto del electrodo-ánodo con el aluminio. El gas atraviesa el cátodo, es ionizado y proyectado a presión hacia el metal, esto genera altas temperaturas, por lo que es necesario tener un sistema de enfriamiento con agua en los electrodos (cátodo y ánodo).

Electrodos: el ánodo y el cátodo son de grafito. El ánodo es un cilindro sólido y el cátodo es un cilindro

Gas plasma: el gas utilizado para generar el plasma es nitrógeno, el cual se inyecta a través del cátodo.

1.4 Eficiencia

Los cálculos de la eficiencia del horno de fundición están basados en el principio de eficiencia térmica. Es la razón entre la energía contenida en las paredes del horno más la recibida por el metal, y la energía total de entrada. En este caso, se hace distinción entre la energía del precalentamiento y la de fundición, en el caso de gas propano es el PCI del combustible; para el plasma, la energía eléctrica utilizada [13].

$$\eta = \frac{M_m (C_m \Delta T_m + L_f) + M_r C_r \Delta T_r}{E_{prec} + E_{fus}} \quad (1.1)$$

Donde: M es masa, C calor específico, T temperatura, L calor latente y E energía. El subíndice m se refiere al metal, aluminio, r al refractario, $prec$ y fus son el precalentamiento y fusión respectivamente. Para el cálculo de la energía absorbida por el refractario se utiliza la temperatura promedio (ΔT_r).

2 Simulación numérica del horno

2.1 Precalentamiento con combustión de gas

A continuación se muestra la arquitectura de la simulación del precalentamiento:

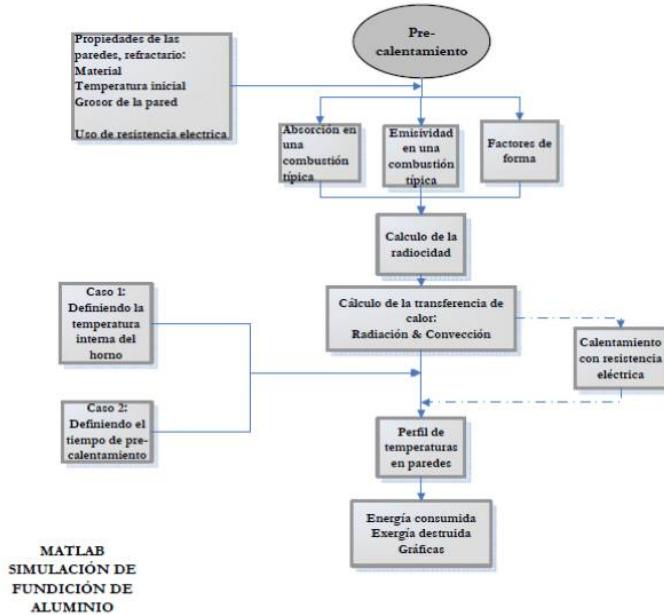


Figura 4: Arquitectura de la simulación, precalentamiento

Para realizarla primero se define el material, espesor y temperatura inicial de las paredes del horno. La simulación calcula la atmósfera característica dentro del horno (absorción y emisividad de los gases de combustión). Una vez que se conoce el comportamiento de los gases de la combustión, se determinan los factores de forma de Howell [17], que proporcionan información sobre la proporción de la radiación dentro del horno que deja una superficie y alcanza a otra. Con estos datos, la transferencia de calor por radiación (factores de forma) y por convección (atmósfera de gases dentro del horno) pueden ser calculadas.

La simulación del precalentamiento inicia desde cualquier temperatura inicial ($30 [^{\circ}C]$ para el caso base) y puede ser simulada de dos maneras:

- Asignando un tiempo de precalentamiento.
- Asignando la temperatura interior del horno deseada. Este modo es útil para verificar cuánto tiempo tarda el sistema en llegar a un set point deseado, de esta manera se puede optimizar el consumo energético durante el precalentamiento.

En ambos casos, una resistencia eléctrica en colocada en el fondo del horno puede ser activada para ayudar con el proceso de precalentamiento; éste es opcional.

El balance energético empleado para simular el horno se adoptó de procedimientos anteriormente utilizados por [18], [19], [13]. Consiste en una ecuación principal para la cámara de combustión y una ecuación transitoria de transferencia de calor, ambas describen la conservación de la energía en el sistema. Se establece que la razón de energía acumulada iguala el calor producto de la combustión, menos la suma del calor transferido a las paredes del horno, la extracción del sistema (salida de gases) y la fusión del aluminio.

$$\rho \cdot V \cdot C \cdot \frac{dT_{gb}}{dt} = Q_{hi} - (A_w \cdot Q_w + A_l \cdot Q_l + Q_{ch}) \quad (2.1)$$

En la ecuación anterior, V es el volumen del horno, C es la capacidad calorífica, T_{gb} es la temperatura del gas, A es el área de la superficie. Los subíndices: hi combustible, w paredes, l energía de fusión y ch extracción del sistema.

Aunque no lo indica la ecuación 2.1 implícitamente, el modelo requiere como datos de entrada: la geometría del horno, tipo y cantidad de energía utilizada, coeficientes de convección y conducción de calor, así como las propiedades radiativas del refractario.

Durante el precalentamiento con gas, la transferencia total de calor dentro del horno se describe en la figura 5. Dentro del horno la transferencia de

calor por radiación es abundante, todas las superficies intercambian energía entre sí, incluyendo la atmósfera de los gases producto de la combustión. El suelo del horno intercambia radiación con la tapa y las paredes (flujos 1 y 2). Debido a la configuración geométrica del horno, las paredes son realmente una sola pared, que intercambia energía con ella misma (flujo 3), finalmente la tapa del horno intercambia energía con las paredes (flujo 4). Las líneas sólidas indican el efecto de la convección dentro del horno. Además también es necesario un modelo de conducción en la pared. Una descripción detallada de la simulación del precalentamiento se encuentra en los apéndices A.1, A.2 , A.3 y la implementación de *Matlab* puede verse en apéndices B.1, B.2, B.3 y B.4.

Como salida de la simulación del precalentamiento se obtienen los perfiles de temperatura (Apéndice A.2), consumo de energía, exergía destruida (Apéndice C.2) y gráficas del proceso.

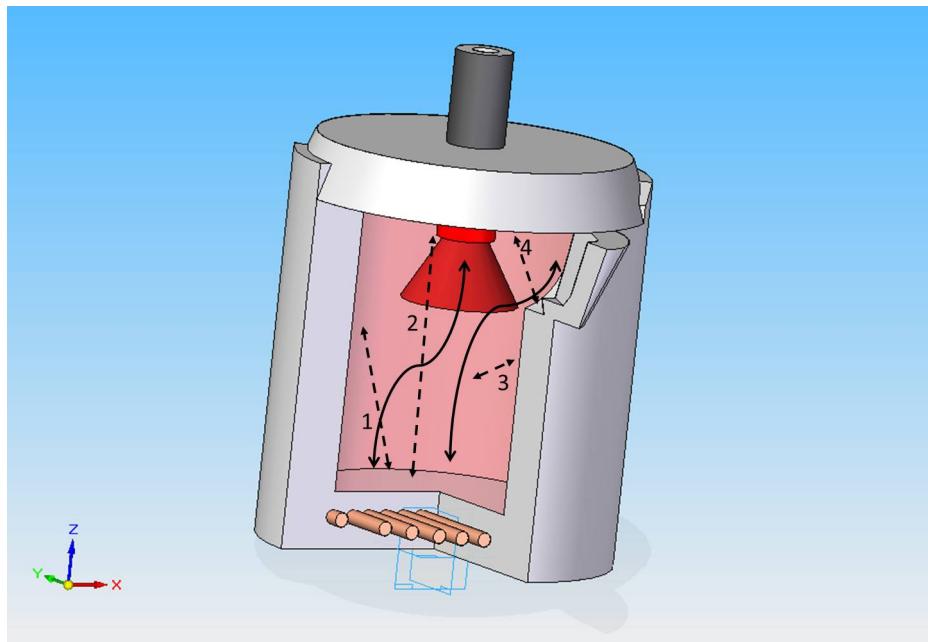


Figura 5: Transferencia de calor durante el precalentamiento

2.2 Simulación de la fusión del aluminio

La simulación de la transferencia de calor, con combustión de gas o con plasma, del aluminio tiene los mismos mecanismos de intercambio de energía descritos en el apéndice A. Se considera un intercambio de radiación entre superficies y el efecto de convección dentro del horno.

La figura 6 muestra los nodos de temperatura dentro del aluminio en una dirección (1-D), en la cual la energía que produce la fusión ésta en contacto directo con la superficie del metal y transfiere energía hacia abajo hasta que el proceso de fusión termina.

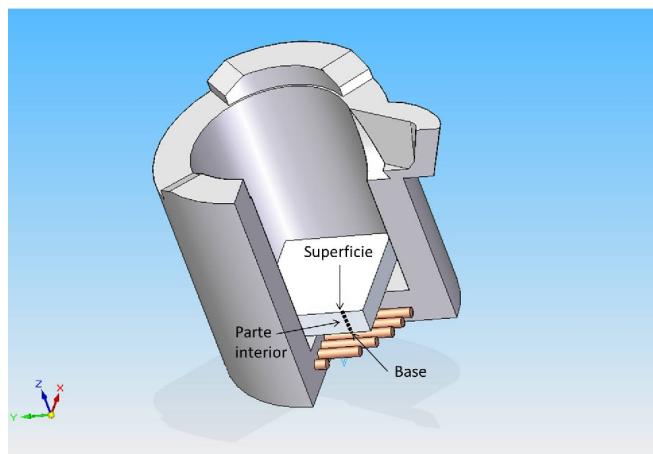


Figura 6: Configuración de los nodos de temperatura en el aluminio

Se asume que la placa de metal cubre completamente el fondo del horno y que la transferencia de calor tiene el mismo mecanismo que el calentamiento de las paredes, con la diferencia de que al llegar a los $660 [^{\circ}\text{C}]$, temperatura a la que se realiza la fusión del aluminio, las condiciones de frontera cambian para simular el cambio de fase. Cuando se alcanza esta temperatura en la superficie del aluminio, se inicia un conteo de cuánta energía recibe el metal, mientras todos los nodos igualan la temperatura. Finalmente, cuando el calor recibido en el metal iguala el calor necesario para el cambio de fase, las condiciones de frontera son restauradas y la temperatura sigue aumentando hasta llegar a la temperatura deseada, definida por el usuario de la simulación.

De igual forma que en el precalentamiento, de la simulación se obtienen los perfiles de temperatura de las paredes del horno y el aluminio al final de la fusión, la energía consumida, la exergía destruida, la eficiencia del sistema y la energía por unidad de masa fundida.

Dicho anteriormente, la simulación de la fusión puede llevarse a cabo de dos maneras distintas, una mediante la combustión de gas propano y otra con plasma. El proceso de fusión con gas es el primero que se analizará.

2.2.1 Fusión del aluminio con combustión de gas propano

Después del precalentamiento, se simula que el metal es colocado dentro del horno. Se considera que el metal colocado dentro del horno cubre todo el fondo del mismo, por lo que un incremento en la masa del aluminio afectará al espesor del aluminio simulado. Por este hecho, la distribución geométrica dentro del horno cambia y los factores de forma son recalculados, como esto también afecta a la radiación y la convección dentro del horno, ambos son recalculados nuevamente, ver figura 7.

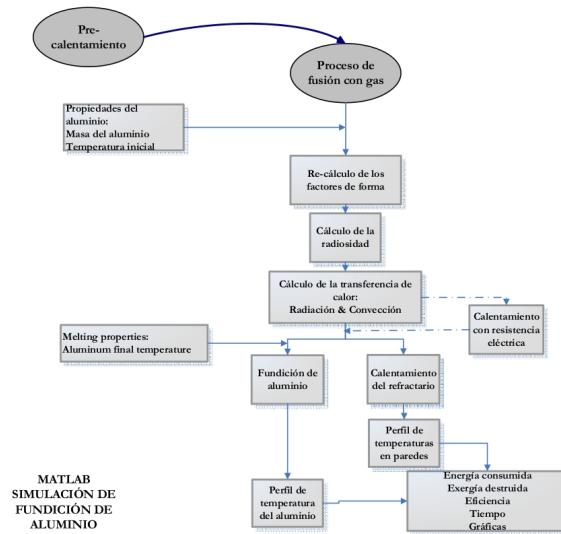


Figura 7: Arquitectura de la simulación de fusión con gas

Para realizar la simulación, se tienen que definir la temperatura inicial y

final del aluminio. La simulación también se puede llevar a cabo suponiendo que existe una resistencia eléctrica que contribuye a la fusión del aluminio (apéndices A.5 y B.5).

2.2.2 Fusión del aluminio con plasma

La simulación de la fusión con plasma es diferente, ya que la cantidad que hay gases intercambiando calor es mínima y despreciable; en su lugar se encuentra una antorcha de plasma transmitiendo energía directamente al aluminio. La radiación y la convección ocurren debido a la alta temperatura de la llama de plasma, el proceso de simulación se muestra en la figura 8.

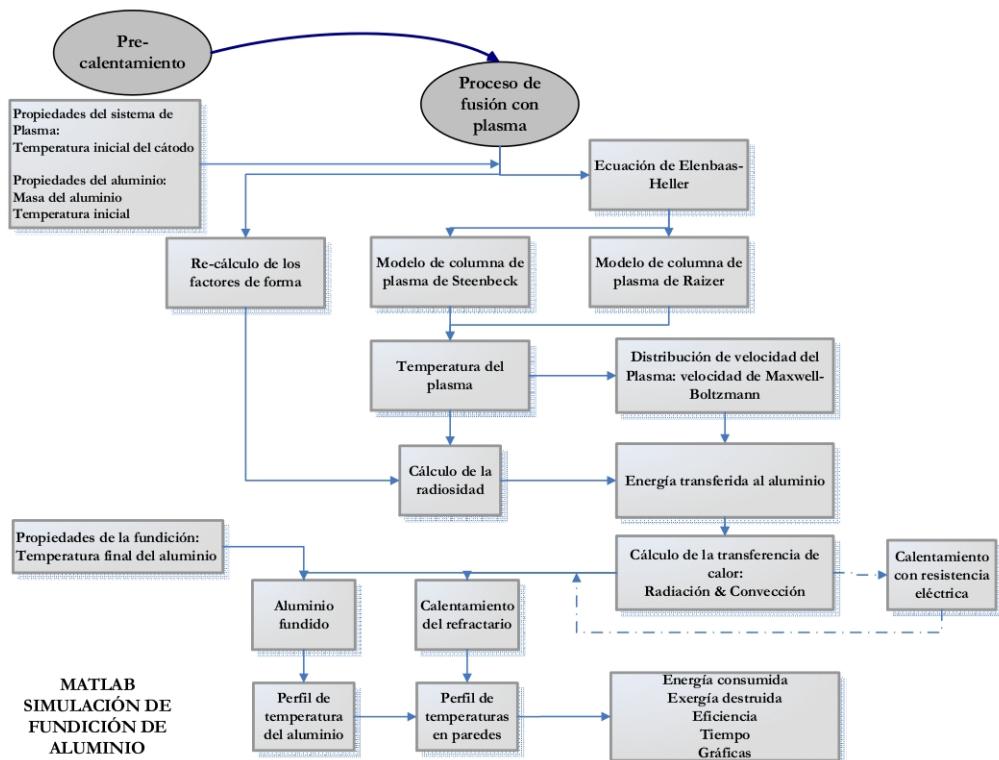


Figura 8: Arquitectura de la simulación de fusión con plasma

El uso del plasma requiere la presencia de un ánodo y un cátodo dentro del horno (los efectos del ánodo se desprecian, el ánodo está directamente

en contacto con el metal por lo cual éste es el propio ánodo). Esto cambia completamente los factores de forma, por lo que se requieren nuevas expresiones que definan la nueva configuración del sistema.

La simulación del plasma es llevada a cabo con ayuda de tres enfoques complementarios distintos. Primero se utiliza la ecuación de Elenbass-Heller [12] para proponer un sistema de ecuaciones en el cual, la distribución de las temperaturas el campo eléctrico y efecto Joule se relacionan entre sí. Luego se elaboran algunas simplificaciones con ayuda del modelo de columna de plasma de Steenbeck y con el modelo de Raizer. En [12] se demuestra que el modelo de Steenbeck y el de Raizer llegan al mismo resultado con ecuaciones equivalentes entre sí, por tal motivo se utilizaron ambos enfoques para la realización de este proyecto.

El modelo de Steenbeck propone que la temperatura del plasma T_m debería minimizar la potencia específica de descarga w y el campo eléctrico E con valores fijos de corriente I . El modelo de Raizer dice que una buena aproximación del campo eléctrico en la llama de plasma se obtiene cuando se consideran constantes y máximas la temperatura y la conductividad térmica. Por tanto, se obtiene una relación directa entre la temperatura del plasma y el campo eléctrico, que hace posible el cálculo de ambos.

Una vez que la temperatura del plasma es calculada, se determina la energía cinética de las partículas del plasma a través de la distribución de velocidad de Maxwell-Boltzmann. El impacto de estas partículas en el aluminio en combinación con la alta temperatura proveen el calor necesario para realizar la fusión. Como en el caso anterior, si la resistencia eléctrica es activada, ésta participará en el proceso de transferencia de calor durante la fusión con plasma. Es necesario añadir el efecto de la radiación de las paredes del horno para finalmente calcular la potencia recibida en el aluminio.

Una vez que se calcula el modelo energético, la simulación calcula el perfil de temperaturas en el aluminio y las paredes del horno al mismo tiempo. De esta simulación también se obtienen los consumos de energía, la exergía destruida, la eficiencia y gráficas a lo largo del tiempo.

El apéndice A.4 trata el tema del plasma con más detalle.

2.3 Balance de exergía en el horno de fundición de aluminio

La realización de auditorías para el diagnóstico energético de instalaciones industriales es una práctica recomendable para el uso y control eficaz de energía [20]. Hasta el momento se han llevado acabo balances de materia y energía de dos sistemas distintos para la fundición de aluminio, horno de gas y horno de plasma, también se obtuvieron los rendimientos de cada sistema. Sin embargo, para obtener un análisis libre de ambigüedades e incertidumbres más detallado del sistema en la toma de decisiones es conveniente realizar un análisis exergético que muestre el potencial real de ahorro existente en este tipo de sistemas.

Sobre el tema del análisis exergético en hornos para fundición (no se han realizado muchos estudios), sin embargo se destacan dos trabajos que pueden hacer una gran aportación al tema, el primero es de Hakan C. [14], quien realizó una investigación sobre el comportamiento de un horno de gas natural para la fundición de acero mediante la utilización de un tubo radiante, el proyecto muestra el cálculo de la exergía del acero de forma transitoria durante las tres horas de operación del horno analizado, se obtiene una temperatura promedio de $666\text{ }^{\circ}\text{C}$ con la cual se calcula la eficiencia exergética del sistema. Por otro lado, Dennis Lee [11] presenta una evaluación exergética completa para una planta de fundición de aluminio en hornos que operan con gas natural. Los resultados sobre la eficiencia exergética y las destrucción de exergía, en este trabajo permitieron comprender mejor el sistema de quemadores, lo que llevo a una mejora potencial del sistema.

El análisis exergético se basa en el segundo principio de la termodinámica, el valor de la exergía depende tanto del estado termodinámico en que se encuentra la sustancia que constituye el sistema, como de la temperatura, presión y composición química del ambiente. La definición de exergía y la determinación de su valor van unidas a la definición y propiedades termodinámicas del ambiente de referencia, (AR) [21].

La exergía de un sistema es la medida de su potencial de evolución por no estar en equilibrio termodinámico con el ambiente [21]. De esta manera un análisis exergético permite un estudio detallado de las transformaciones

ocurridas en un sistema tomando en cuenta, además de la cantidad, la calidad de la conversión.

El nivel de agregación desglosa la información que se tiene del sistema, permitiendo contabilizar las irreversibilidades en cada subsistema. El número de subsistemas incluidos en la estructura global podría crear un cambio en la conclusión del análisis. Los resultados no pueden ir más allá del nivel de agregación dado, por tal motivo para obtener mejores resultados hay que integrar todos los flujos y todos los equipos con sus subsistemas y el entorno AR al análisis [22].

Para el caso de éste horno de fundición de aluminio, se considera como un equipo que consta del contenedor fabricado con material refractario y que tiene un sistema de calentamiento intercambiable entre quemador de gas y generador de plasma, también se pueden distinguir dos procesos secuenciales para realizar dicha fundición:

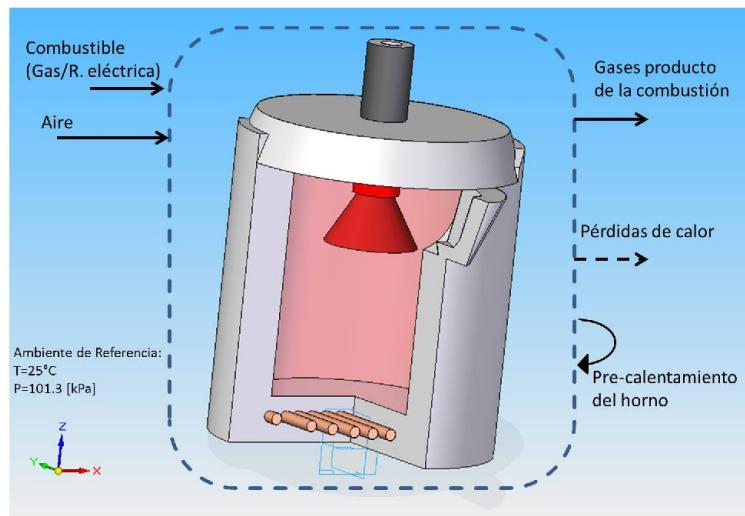


Figura 9: Nivel de agregación del horno durante el precalentamiento

- precalentamiento, figura 9 : En este proceso se distinguen dos entradas de exergía, la del combustible con o sin electricidad y tres salidas, la exergía de los gases de combustión, las pérdidas de calor y el horno precalentado, este no es exactamente un flujo de salida, pero es el

producto deseado y obtenido del proceso de precalentamiento.

- Fundición del aluminio, figura 10 :Para el proceso de fundición existen hasta tres entradas de exergía, la primera es el fuel del sistema, que puede ser en forma de gas o electricidad para activar el sistema de plasma, ambos casos pueden ser acompañados o no de una resistencia eléctrica. La segunda entrada es el aire para la combustión o el nitrógeno para el plasma, finalmente la última entrada es el aluminio sólido a fundir. La salida tiene tres flujos, gases producto de la combustión o nitrógeno producto de la ionización, pérdidas de calor y el producto que es el aluminio líquido.

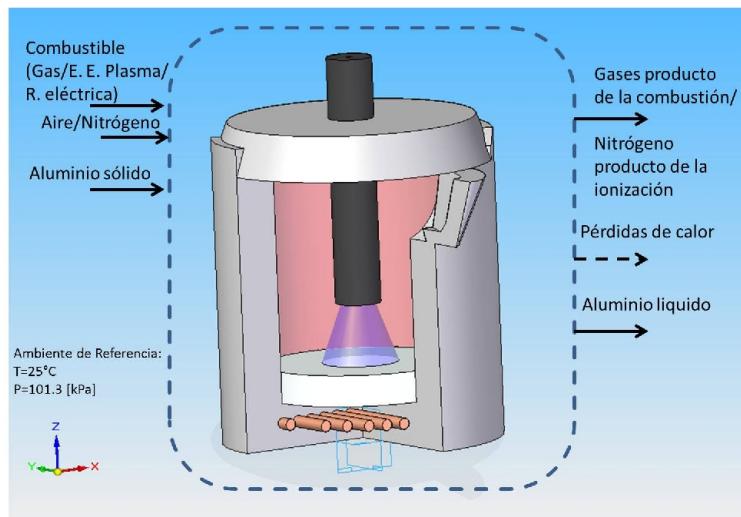


Figura 10: Nivel de agregación del horno durante la fusión

Ecuaciones detalladas de la exergía en el horno se encuentran en el apéndice C.1.

3 Validación de los resultados

Para obtener el modelo final se hicieron dos validaciones, los algoritmos de simulación de la combustión y la transferencia de calor dentro del horno y después, los algoritmos de simulación del plasma con datos experimentales.

Para la primer validación se recurrió al trabajo realizado en 2010 por Ighodalo [13]. En este trabajo se simula el comportamiento de un horno de fundición de aluminio con forma cúbica; entonces para validar se programaron algoritmos nuevos de factor de forma para simular esa geometría, el resto de ellos permanecieron intactos.

Con los datos proporcionados en el artículo, y basados en su propia bibliografía se pudo obtener un modelo que asemejaba mucho el comportamiento mostrado en ese trabajo.

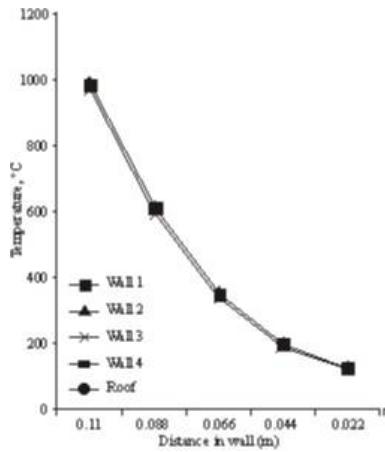


Figura 11: Perfil de temperatura de horno cúbico, resultados obtenidos por Ighodalo [13]

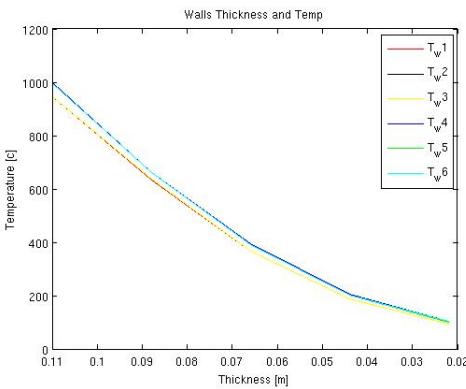


Figura 12: Perfil de temperatura de horno cúbico, resultados obtenidos por la simulación

Las figuras 11 y 12 muestran los resultados obtenidos por Ighodalo y la simulación realizada para validar el modelo, como se puede observar los modelos predicen un comportamiento similar, que a su vez, en ese mismo artículo corroboran con datos de experimentales de un horno fabricado en el mismo centro de investigación.

Una vez que se comprobó el modelo de transferencia de calor y se reasignaron los factores de forma para un horno cilíndrico, sólo resta validar el algoritmo de simulación del plasma. Esto se realizó con la ayuda de datos experimentales, que por motivos de confidencialidad se muestran en forma adimensional en la figura 13.

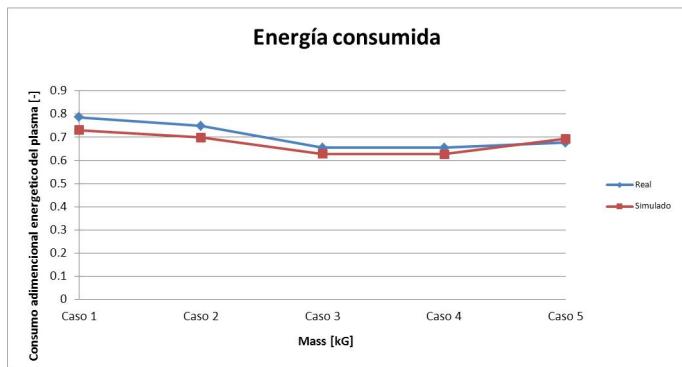


Figura 13: Validación del algoritmo de simulación del plasma

Se observa que los datos experimentales no varían mucho de los simulados. El modelo responde de manera sensible a los cambios en la cantidad masa de aluminio de cada caso real. Como se observa en la figura 13 el modelo sigue la misma tendencia que los valores obtenidos de manera experimental, lo que comprueba su efectividad.

4 Resultados del modelo

4.1 Datos iniciales de la simulación

Se realizó una comparación entre el horno operando con plasma y con gas propano, se va a mostrar en un ejemplo que el horno de plasma es más eficiente que el de gas.

Al realizar la simulación, primero se definieron algunos parámetros. Para el caso del horno de plasma el ánodo se considero como un cilindro sólido con un diámetro de 8 [cm] y el cátodo como un cilindro hueco con un diámetro exterior de 8 [cm] y un diámetro interior de 1 [cm].

Hay que señalar que para el precalentamiento del horno se simuló un tiempo de operación de 60 minutos para llegar a los 733 [°C]. Y que también se pude definir la temperatura que se desea dentro del horno, por ejemplo si se definen 700 [°C], la simulación arrojara un tiempo estimado de 50 minutos.

Parámetro	Simulación plasma	Simulación gas
Material refractario	Plascast	Plascast
Grosor de las paredes [m]	0.0779	0.0779
Potencia del quemador, precalentamiento [kW]	10	10
Potencia del quemador, fusión [kW]	30	40
Tiempo de precalentamiento [min]	60	60
Temperatura inicial de las paredes [°C]	30	30
Temperatura inicial del cátodo [°C]	30	0
masa del metal [kg]	9.35	9.35
Temperatura inicial del aluminio [°C]	30	30
Temperatura final deseada del aluminio [°C]	800	800

Tabla 1: Datos de entrada de la simulación

Con estos datos el programa puede hacer una simulación completa y comparativa del horno funcionando con plasma y con gas.

4.2 Resultados del análisis de transferencia de calor

La simulación se realiza en Ubuntu 10.10 con *Matlab R2011a*, dependiendo del tiempo establecido para cada iteración y si se despliegan resultados en la pantalla o no, la simulación puede tardar de 2 a 7 minutos. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Parámetro	Simulación plasma	Simulación gas	Diferencia plasma y gas
Precalentamiento [min]	60	60	0
Energía del precalentamiento [kWh]	10	10	0

Tabla 2: Resultados de la simulación, precalentamiento

A continuación, se explican los siguientes parámetros:

- Temperatura final del metal: Temperatura a la que queda el aluminio fundido.

Parámetro	Simulación plasma	Simulación gas	Diferencia plasma y gas
masa del metal [kg]	9.35	9.35	0
Temperatura final del metal [°C]	810.45	803.7	6.74
Tiempo de fundición [min]	8.98	14.39	-10.68
Energía en fundición [kWh]	4.49	9.59	5.10
Velocidad de fundición [kg/h]	8.13	7.54	1.8
Eficiencia del plasma [%]	64.76	-	-
Energía del plasma por unidad de masa [kWh/kg]	0.48	-	-
Eficiencia total [%]	43.57	25.50	18.06
Energía total por unidad de masa [kWh/kg]	1.55	2.63	-1.08

Tabla 3: Resultados de la simulación, fusión y totales

- Tiempo de precalentado: El tiempo que se utilizó el quemador de 10 [kW] para realizar el calentamiento.
- Tiempo de fundición del aluminio.
- Energía del plasma.
- Velocidad de fundición: El tiempo necesario para fundir un kilogramo de aluminio.
- Eficiencia del plasma: El relación entre la energía del plasma y la requerida para al fundición.
- Energía del plasma por kilogramo de aluminio fundido.
- Eficiencia total: Relación entre la energía del plasma con la del combustible utilizada en el precalentamiento y la energía de fundición, ecuación 1.1.
- Energía total por unidad de masa. Éste es otro parámetro para medir la eficiencia del sistema. Considera la energía total utilizada en el sistema y la compara con la masa del metal fundido.

Las tablas 2 y 3 muestran los resultados para el caso de 9.35 [kg] de aluminio fundidos hasta una temperatura de 800 [°C] después de 60 minutos de precalentamiento. Las gráficas obtenidas se muestran a continuación. La eficiencia del plasma se calculó de 64%, el consumo de energía esta alrededor de 0.48 [kWh/kg] y la eficiencia total es de 43.57%. Considerando la energía del precalentamiento, su consumo total es de 1.55 [kWh/kg].

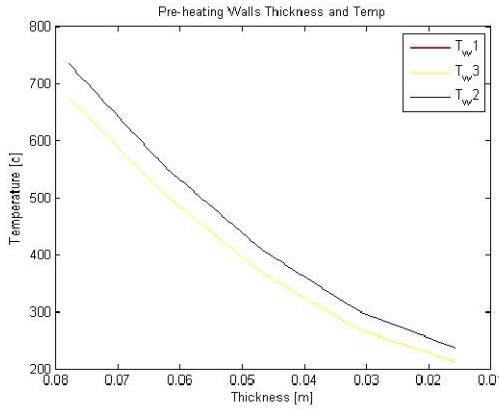


Figura 14: Perfil de temperatura al final el precalentamiento

La figura 14 muestra la temperatura a través de las paredes del horno (T_1 , T_2 y T_3 son la tapa, el suelo y las paredes del horno respectivamente). Se puede ver que dentro del horno hay una temperatura $500 [^{\circ}\text{C}]$ mayor que en la parte exterior, este perfil fue obtenido durante 60 minutos de precalentamiento como muestra la figura 15.

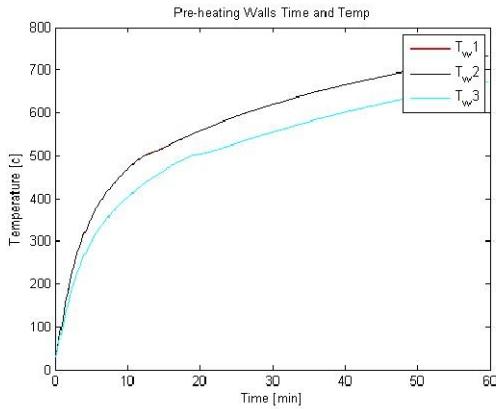


Figura 15: Variación de la temperatura durante 60 minutos de precalentamiento

La gráfica del comportamiento del aluminio muestra que existen tres zonas bien definidas en el perfil de temperatura; primero la temperatura se eleva

desde la temperatura inicial hasta el punto de fusión del aluminio, en este punto se conserva la temperatura mientras se realiza el cambio de fase, finalmente la temperatura continua subiendo hasta llegar a la temperatura del líquido deseada.

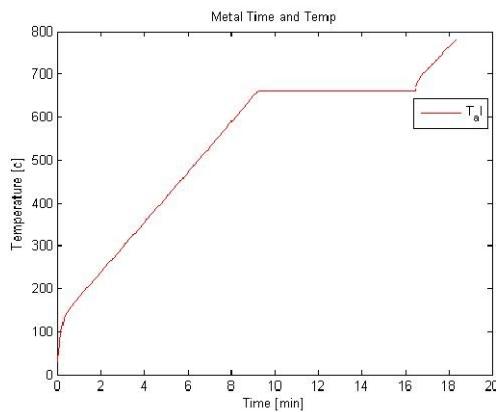


Figura 16: Proceso de fundición del aluminio

Durante del proceso de fusión las temperaturas en la parte interior de las paredes del horno son las siguientes:

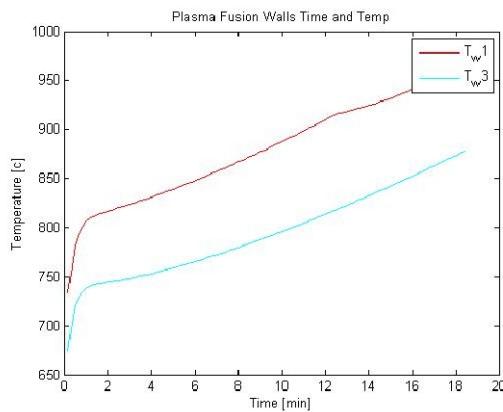


Figura 17: Perfil de temperaturas del refractario después de la fusión

Como se muestra en la figura 17, después de 9 minutos de la fusión con

plasma, el interior del horno alcanza los $900 [^{\circ}C]$.

4.3 Resultados del cálculo exergético

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la simulación del horno funcionando con plasma y con gas para el mismo caso que los resultados anteriores, la siguiente tabla contiene los valores obtenidos para el precalentamiento del horno y la fusión del aluminio:

Parámetro	Gas simulado	Gas simulado %	Plasma simulado	Plasma simulado %	Diferencia plasma y gas
masa del metal [kg]	9.35	-	9.35	-	0
Exergía del recurso [kWh]	10.32	97.48	4.48	96.08	5.8
Exergía inicial del metal [kWh]	0.27	2.52	0.18	3.92	0.08
Exergía gases de combustión [kWh]	2.88	27.17	0.66	14.15	2.21
Exergía agua [kWh]	0	0	0.031	0.64	-0.03
Exergía perdida [kWh]	0.76	7.17	0.54	11.69	0.21
Exergía metal líquido [kWh]	2.43	22.95	2.43	52.10	-0.0036
Exergía Destruída [kWh]	4.44	41.92	1.08	23.21	3.35
Exergía total específica. [kWh/kg]	2.27	-	1.68	-	0.59
Exergía Destruída específica [kWh/kg]	1.16	-	0.82	-	0.32

Tabla 4: Análisis exergético del horno de aluminio

Se observa que durante la fusión con plasma se producen menos irreversibilidades que durante la fusión con gas. Para realizar el mismo proceso, en el caso de gas se consume casi el doble de exergía que en el caso de plasma. En porcentajes se puede ver que la exergía que adquiere el metal al final de la fundición, para el caso de gas es del 23% del total de exergía del fuel, mientras que en el caso de plasma el metal adquiere el 52% de la exergía del fuel, lo que nos indica un proceso más eficiente. Esto también se ve reflejado en la destrucción de exergía, ya que en el caso de gas se destruye tres veces más exergía que con el plasma. Es importante mencionar que en el caso del plasma, y debido al nivel de agregación elegido, la exergía destruida en una central térmica para producir la energía eléctrica no se contabiliza, también hay que tener en cuenta que la energía puede provenir de un sistema de energía renovable y un análisis de ciclo de vida podría eliminar la incertidumbre que existe al respecto.

En términos globales la exergía consumida durante todo el proceso es de $2.27 [kWh/kg]$ y $1.68 [kWh/kg]$, en el horno de gas y en el de plasma respectivamente, la destrucción de exergía es de $1.16 [kWh/kg]$ para el caso de gas y $0.82 [kWh/kg]$ para el plasma.

Con la simulación se puede obtener una gráfica del transitorio de la exergía del aluminio durante toda el tiempo en que se eleva su temperatura, cambia de fase y se alcanza la temperatura deseada.

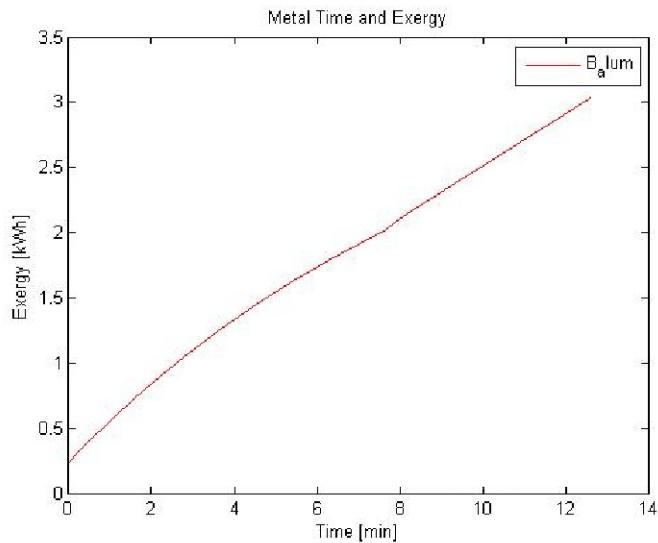


Figura 18: Exergía del aluminio durante todo el proceso de fundición

4.4 Influencia del material refractario

En los análisis anteriores se observa que el mayor consumo energético para el horno de plasma se obtiene durante el precalentamiento. El refractario influye en dos casos: pérdidas energéticas y consumo de energía para el precalentamiento

Para analizar este problema se realizaron una serie de simulaciones paramétricas que permiten ver el comportamiento del sistema al cambiar las propiedades del refractario. De entre todas, las principales pruebas realizadas, se simuló un cambio en la emisividad del refractario, y en la capacidad calorífica.

El primer parámetro estudiado es la emisividad (habilidad del material de absorber y radiar calor), generalmente se considera como una propiedad física inherente que normalmente no cambia. Sin embargo, el desarrollo de nuevas

técnicas para producir recubrimientos de alta emisividad permite al material aumentarla de manera considerable. Por lo general, la emisividad interna de un horno es de 0.3, pero los materiales nuevos pueden llegar a alcanzar valores de hasta 0.8 o superiores, lo que resulta en una mejor transferencia de calor mediante radiación. Otro beneficio de ello es la transferencia de calor es más uniforme lo que aumenta la vida útil del refractario y componentes metálicos dentro del horno como tubos radiantes. Para hornos intermitentes u hornos donde se requieren calentamientos rápidos , el uso de paredes con alta emisividad permite reducir el consumo de combustible entre 25[%] y 45[%] [23]. La figura 19 muestra que la simulación cumple exactamente con el comportamiento descrito en bibliografía, obteniendo mayores consumos con emisividades más bajas. Se observa que hay una disminución de casi el 30 [%] cuando la emisividad pasa de 0.3 a 0.85.

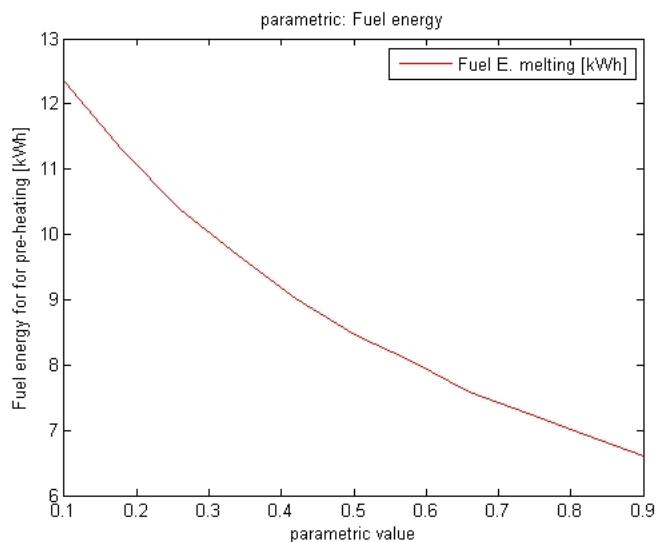


Figura 19: Consumo de energía durante el precalentamiento variando la emisividad

El incremento de la capacidad calorífica incrementa el consumo de energía, principalmente en el precalentamiento porque para llegar a la misma temperatura interior, el material necesita absorber más energía.

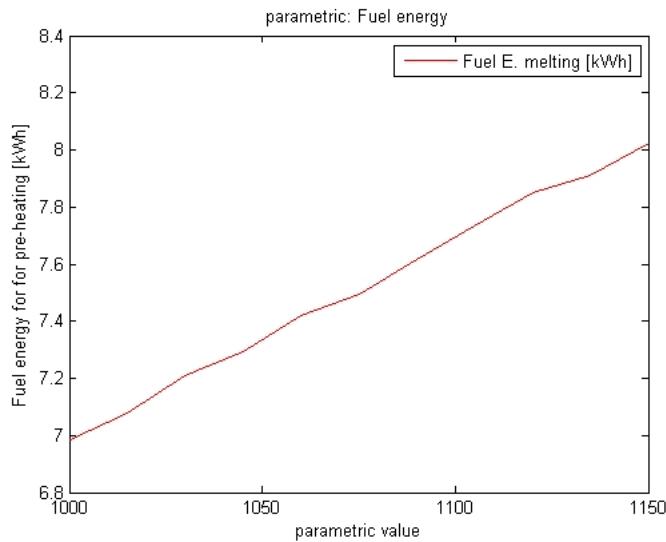


Figura 20: Consumo de energía durante el precalentamiento variando la capacidad calorífica

Pensando en estos problemas, se plantea que existen dos posibles soluciones para ahorrar energía, la primera es utilizar un refractario más resistente, que soporte cambios bruscos de temperatura sin afectar su estructura física y la segunda es la elección de un refractario con mejores propiedades térmicas, que permita disminuir el espesor de las paredes del horno, ambos con o sin recubrimiento para cambiar la emisividad. El modelo permite simular cambios en las propiedades del material refractario y comparar su rendimiento con los materiales actualmente utilizados.

5 Conclusiones

Este trabajo permite observar de manera general el panorama actual que existe en la aplicación de tecnologías de plasma en la industria de la metalurgia, de esto ya se han publicado varias revisiones bibliográficas [10]. El enfoque del ahorro de energía en conjunto con un análisis exergético se ha estudiado detalladamente en [11] y [14] para sistemas convencionales, la aplicación de estos análisis a sistemas de plasma permitirá impulsar la mejora de ellos en este momento en que se ha comprobado que es más

factible la implementación de nuevas tecnologías, que el mejoramiento de sistemas ya establecidos [10].

Se presentaron dos modelos de horno para fundir aluminio, ambos se desarrollaron de manera paralela con la intención de hacer una comparativa. El balance de masa es relativamente sencillo, ya que al no considerar impurezas en el aluminio, los modelos no toman en cuenta pérdida de masa en el metal; todo el aluminio sólido que se coloca en el horno sale como aluminio líquido, tampoco se consideran cambios químicos. Por otro lado, se pueden distinguir dos fases en el proceso: el precalentamiento con gas propano y la fusión con plasma o con gas, pero con un quemador más potente.

El consumo energético para el horno de plasma en el precalentamiento implica casi el 50% de la energía consumida en una fusión promedio de 9 [Kg], si se realiza más de una prueba sólo es necesario un precalentamiento, por lo cual ese consumo energético debe repartirse de manera proporcional con cada iteración realizada. Esto indica que un posible ahorro de energía se debe buscar en el precalentamiento; según la investigación realizada el ahorro se podría lograr de dos maneras: la implementación de un refractario con mejores propiedades térmicas que permita reducir el espesor de las paredes del horno (en este caso se pueden utilizar refuerzos de Cr_2O_3 o de ZrO_2) o un material que tenga mayor resistencia al choque térmico, como alúmina reforzada con nanotubos de carbón, que no requiera tanto tiempo de precalentamiento. En la primera opción el ahorro de energía es indirecto, ya que se encontrará en la fabricación del horno, mientras que la segunda opción permitirá una disminución del consumo de gas propano durante el precalentamiento.

Con los datos experimentales (los cuales son confidenciales) que se tenían, se pudo verificar el buen funcionamiento de la simulación. Las diferencias que se encontraron en el consumo de la energía son mínimas en la mayoría de los casos (tabla 13), lo que demuestra que el modelo tiene un gran potencial para simular con exactitud el funcionamiento del horno. Esto es de gran importancia, ya que una simulación validada ahorra tiempo y dinero en un proyecto de investigación. Con la simulación realizada se pueden proponer distintos escenarios: cambios en las propiedades del material, masa del aluminio, temperaturas iniciales, diferentes tipos de combustible y tiempos de operación, lo que conduce a propuestas para mejorar el sistema

y optimizar el proceso de fusión.

El análisis energético demuestra los primeros indicios sobre cómo ahorrar energía cuando se emplea la tecnología de plasma en un horno de fundición, mostró que existe un consumo de energía alto durante el precalentamiento, sin embargo este análisis parece demostrar que la alta temperatura de las paredes del horno es la mayor pérdida energética que hay dentro del proceso. Es aquí donde el análisis exegético cobra importancia, ya que con él es posible analizar la perdida de calidad que existe durante el proceso, así como detectar los procesos que provocan ésta degradación.

Hacer la distinción en el tipo de energía es importante para realizar el análisis exergético; no es lo mismo la exergía de un combustible al que hay que quemar en una combustión, que la energía eléctrica (energía con más calidad) con la que se alimenta el sistema de plasma. Para este caso se consideró un nivel de agregación tal que únicamente existe el horno, el metal y una fuente exergética, ya sea de combustible o de electricidad. La simulación mostró que cuando el horno funciona con gas las irreversibilidades son mayores que operando con plasma, esto se debe en primer lugar a la calidad de la fuente de energía y en segundo a la capacidad del plasma para enviar exergía directamente al metal, sin intermediarios y sin pérdidas de exergía por convección u otros medios de transferencia de calor.

Los resultados obtenidos son muy prometedores, sin embargo se pueden mejorar al realizar un análisis más detallado de las ecuaciones del plasma, el nivel de agregación puede ser más detallado para describir procesos de exergía, hasta este momento no se han tomado en cuenta las fuentes externas de energía; no hay consideraciones sobre el origen de la energía eléctrica, ni las irreversibilidades que esto implica. En cuanto a la transferencia de calor se puede plantear un análisis más detallado donde se muestren los procesos en estado transitorio del intercambio de exergía por radiación y no sólo entradas y salidas. La exergía del plasma es otro tema que tiene un campo muy amplio para trabajar, la dificultad de las ecuaciones desarrolladas hasta el momento es un gran obstáculo para un análisis de ingeniería. Por último cabe señalar que el modelo puede ser ampliado al incluir un análisis de impurezas en el aluminio y cómo afectan el desempeño del sistema, así como el desarrollo de ejemplos que simulen los transitorios entre carga y descarga del metal durante la operación en continuo. Este trabajo deja una brecha abierta al estudio las tecnologías que, aunque ya tiene muchos años investigándose, están a punto

de cambiar varios procesos en ingeniería al innovarlos: hacerlos más eficientes y ecológicos. De tal manera, es imperioso mejorar la eficiencia energética en las industrias y disminuir así el impacto medio ambiental.

Bibliografía

- [1] Jesús Alfonzo Guevara Aguilar. *Tecnología automotriz*. Technical report, Instituto Universitario de Tecnología Industrial, sede Valencia. Edo. Carabobo, Venezuela., 2003.
- [2] J. Green. *Aluminum recycling and processing for energy conservation and sustainability*. ASM International, 2007.
- [3] J. Kaufman and Elwin L. *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*. ASM International, 2004.
- [4] J. Kaufman. *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*. ASM International, 2000.
- [5] Tianxiang Li, Mohamed Hassan, Kazunori Kuwana, Kozo Saito, and Paul King. Performance of secondary aluminium melting: Thermodynamic analysis and plant-site experiments. *Energy*, 31(12):1769–1779, 2006.
- [6] M. Fu, K. Staples, and V. Sarvepalliis. A high-capacity melt furnace for reduced energy consumption and enhanced performance. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 50(5):42–44, 1998.
- [7] P. Mullinger and B. Jenkins. *Industrial and Process Furnaces. Principles, Design and Operation*. Elsevier, 2008.
- [8] W: Trinks, M. Mawhinney, R. Shannon, and J. Reed. *Industrial Furnaces, Sixth Edition*. John Wiley & Sons, Inc, 2004.
- [9] L. Babos and A.D. Martegani. Energy conservation and recovery in electric arc furnaces dedusting plants. *Energy Conversion and Management*, 22(4), 1982.
- [10] M. Mihovsky. Thermal plasma applications in metallurgy. *J. of the University of Chemical and Metallurgy*, 45(1):3–18, 2010.
- [11] Dennis Lee. *Exergy Analysis and efficiency evaluation for an aluminum melting furnace in a die casting plant*. PhD thesis, Ryerson University, 2003.

- [12] A. Fridman and L. Kennedy. *Plasma Physics and Engineering*. Taylor & Francis., 2004.
- [13] Ighodalo O. A. and C. I. Ajuba. Development and performance evaluation of a melting furnace for non-ferrous metals. *Internal Journal University Epoma-Nigeria*, 4, 2010.
- [14] C: Hakan and H. Arif. Exergetic analysis and assessment of industrial furnaces. *Journal of Energy Resources Technology, ASME*, 132, 2010.
- [15] Ananthapadmanabhan P.V., N. Venkatramani, and C. Suryanarayana. *Thermal plasma processing, in Pergamon Materials Series*. Pergamon, 1999.
- [16] C Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison, and P. Leprince. Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta Part B*, 61:2–30, 2006.
- [17] J. Howell. *A catalog of radiation configuration factors*. McGraw-Hill, 1982.
- [18] R.T. Bui and J. Perron. Performance analysis of the aluminum casting furnace. *Metall. Trans.*, 19B:171–180, 1988.
- [19] I. Master Davies, S.B. and D.J. Gethin. Numerical modeling of a rotary aluminum recycling furnace. *4th International symposium of recycling of metals and engineered materials*.
- [20] A. Valero and M. Lozano. Los balances de energía, entropía, exergía y energía libre. métodos para el diagnóstico de instalaciones industriales. *Dpto. de Termodinámica y Fisicoquímica ETSII de Zaragoza. Ingeniería Química.*, 1987.
- [21] J. Guallar and A. Valero. Exergía y sus componentes en una mezcla. *Dpto. de Termodinámica y Fisicoquímica ETSII de Zaragoza. Ingeniería Química.*, 1990.
- [22] Valero A. and Lozano M. Curso de termoeconomía vol. ii. p. 5.
- [23] Energy efficiency guide for industry in asia. www.energyefficiencyasia.org acceso en Mayo 20, 2011.

- [24] Yantovskii. *Energy and Exergy currents*. Nova science publishers, 1994.
- [25] I. Dincer and M. Rosen. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Elsevier, 2007.
- [26] Mora W. and Borbón A. Latex, 2007. Revista digital Matemática, www.cidse.itcr.ac.cr/revistamate/.
- [27] R.J. Tucker. Gas emissivity, 2003. <http://m.safe.mn/3gHI> acceso en abril 26, 2011.
- [28] J. M. Rhine and R.J. Tucker. *Modelling of gas-fired furnaces and boilers*. McGraw-Hill, 1991.
- [29] Holman. *Heat transfer*. McGraw-Hill, 1986.
- [30] Cengel. *Transferencia de calor y masa*. McGraw-Hill, 2007.
- [31] Reece J. *Industrial plasma engineering volume 1: principles*. Taylor and Francis, 1995.
- [32] L. Mathur. The thermionic work funtion of the graphite. 1952.
- [33] P. Sherstnev, A. Baturin, V. Bormashov, K. Nikolski, and E. Sheshin. Investigation of local work function distribution of field emission cathode from carbon materials doped by ba with the help of afm/sem/x-ray. *Journal of physics and chemistry of solids*, 65, 2004.
- [34] F. Chen. *Introduction to plasma physics and controlled fusion*. Plenum press, 1984.
- [35] G. Dunn and T. Eagar. Calculation of electrical and thermal conductivities of metallurgical plasmas.
- [36] Matweb. Propiedades de los materiales. <http://www.matweb.com> acceso en abril 26, 2011.
- [37] R. Petela and A. Piotrowicz. Exergy of plasma. *Archiwum Termodynamiki i Spalania*, 8:381– 391, 1977.

- [38] Rohit Sharma, Gurpreet Singh, and Kuldip Singh. Modelling of the thermophysical properties in ar-he-h₂ thermal plasmas with electronic excitation. *Rohit Sharma,* Gurpreet Singh and Kuldip Singh*, 58:1703–1707, 2011.
- [39] Suphanita, Bischertb, and Narataruksa. Exergy loss analysis of heat transfer across the wall of the dividing-wall distillation column. *Energy*, 11:2121–2134, 2007.
- [40] A. Agudelo and C. Cortes. Thermal radiation and the second law. *Energy*, 2010:679–691, 35.
- [41] Petela R. Exergy of undiluted thermal radiation. *Solar Energy*, 74:469–488, 2003.
- [42] Göran Wall. *Exergetics*. Exergy, Ecology, Democracy, 2009.
- [43] Badešcu V. Exact and approximate statistical approaches for the exergy of blackbody radiation. *Central European Journal of Physics*, 6(2):344–350, 2008.
- [44] Valero A. and Lozano M. Methodology for calculating exergy in chemical process. *Department of Mechanical Engineering, University of Zaragoza, Zaragoza Spain*.
- [45] Y. A. Cengel and Boles M. A. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill, 2006.
- [46] M. J. Moran and H. N. Shapiro. *Fundamentals of engineering thermodynamics*, 3ra ed. Wiley, 2000.