



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**INFORME SEMESTRE INDUSTRIA
DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DE HORNO DE
FUNDICIÓN**

Autor(es)
Sergio Trujillo López

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica
Medellín, Colombia
2020



INFORME SEMESTRE INDUSTRIA
DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DE HORNO DE FUNDICIÓN

Sergio Trujillo López

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Ingeniero Mecánico

Asesores (a):

Andrés Felipe Colorado Granda. Ingeniero Mecánico, M.Sc, PhD.

Sebastián Gómez. Ingeniero Mecánico.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica.
Medellín, Colombia

2020

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1 IDENTIFICACIÓN DE EMPRESA.....	3
1.1 PLAN ESTRATÉGICO DE LA EMPRESA.....	4
1.2 PRODUCTOS PRINCIPALES.....	5
2 PROBLEMÁTICA	6
3 OBJETIVOS	7
3.1 Objetivo general	7
3.2 Objetivos específicos:	7
4 MARCO TEÓRICO.....	8
4.1 Hornos convencionales	8
4.2 Horno de fundición de alta eficiencia.	12
5 CARACTERIZACIÓN DE PROCESO A ALTA TEMPERATURA	15
5.1 Metodología	15
5.2 Consideraciones	16
6 BALANCE DE MASA.....	18
6.1 Balance estequiométrico ideal y real.....	19
6.2 Exceso de aire.....	20
6.3 Factor de aireación	21
6.4 Balance de masa.....	22
7 BALANCE DE ENERGÍA.....	24
7.1 Energía del proceso	25
7.2 Energía perdida	26
7.2.1 Vaporización del agua.....	26
7.2.2 Inquemados.	27
7.2.3 Gases de combustión.....	27
7.2.4 Paredes.	28
8 RESULTADOS.....	31
9 DIAGNÓSTICO	35
10 OPCIONES DE MEJORAMIENTO	36
10.1 Aislamiento y material refractario	36
10.2 Pre calentamiento de materia prima	38

10.3	Control de factor de aireación	39
10.4	Infraestructura de chimenea.....	40
10.5	Reubicación de quemador	40
11	ANÁLISIS DE PROPUESTAS	42
11.1	Aislamiento.....	42
11.2	Pre calentamiento	42
11.3	Factor de aireación.....	43
11.4	Comparación.....	43
12	PRESUPUESTO.....	46
13	CONCLUSIONES	47
14	REFERENCIAS.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Productos principales de la empresa Fundalco S.A.S	5
Figura 2 Horno de crisol a gas natural. <i>Figura tomada de</i> (Calvo, 2015).....	9
Figura 3 Esquema horno inducción. <i>Figura tomada de</i> (“HLQ INDUCTION EQUIPMENT CO.,LTD,” 2015).....	10
Figura 4 Diagrama de horno de resistencia. <i>Figura tomada de</i> (Lupi, 2017)	10
Figura 5 Esquema funcionamiento horno de reverbero. <i>Figura tomada de</i> (“Wikipedia,” 2001).....	11
Figura 6 Secuencia de operación de quemador auto regenerativo. <i>Figura tomada de</i> (Amell & Cadavid, 2013).....	12
Figura 7 Ciclo de regeneración. <i>Figura tomada de</i> (Pyronics International s.a., 2012).....	13
Figura 8 Esquema de quemador auto recuperativo. <i>Figura tomada de</i> (Auto-recuperativos, n.d.)	14
Figura 9 Horno de coquilla HFN004	15
Figura 10 Esquema de proceso de horno HFN004	18
Figura 11 Termografías del horno HFN004 con cámara termográfica profesional Testo 885-2 .	24
Figura 12 Disposición horno HFN004.....	28
Figura 13 Diagrama Sankey del proceso	33
Figura 14 Distribución de energía perdida por Paredes.....	34
Figura 15 Circuito de resistencias térmicas	36
Figura 16 Aislamiento y material refractario de horno HFN004.....	38
Figura 17 Rediseño horno HFN004. Lado A diseño actual, Lado B propuesta de diseño.	39
Figura 18 Horno HFN004 actual	40
Figura 19 Posición de quemador.....	41
Figura 20 Diagrama Sankey de Rediseño.....	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Información general de la empresa.....	3
Tabla 2 Composición de gas natural de la Guajira para el 2020-1(“PROMIGAS S.A,” n.d.).....	16
Tabla 3 Propiedades físicas de gas natural (“PROMIGAS S.A,” n.d.)	17
Tabla 4 Composición de gases de escape HFN004(INCOMBUSTION, 2017).....	18
Tabla 5 Valores de balance estequiométrico ideal.....	19
Tabla 6 Valores balance estequiométrico real	20
Tabla 7 Exceso de aire	20
Tabla 8 Relación aire-combustible	21
Tabla 9 Balance de masa.....	23
Tabla 10 Variables utilizadas en balance de energía	31
Tabla 11 Balance energía horno HFN004 (F-Chart Software, 2015).....	32
Tabla 12 Comparación de consumo de gas natural y aire	44
Tabla 13 Nueva balance de masa.....	44
Tabla 14 Nuevo balance de energía (F-Chart Software, 2015)	45
Tabla 15 Costos.....	46
Tabla 16 Ahorro.....	46

GLOSARIO

- **Fundición:** Proceso de fabricación de piezas, metálicas o plásticas, el cual consiste en fundir el material e introducirlo en una cavidad donde se solidifica y toma la forma de dicha cavidad.
- **Horno reverbero:** Tipo de horno generalmente rectangular, cubierto por una bóveda de ladrillo refractario y con chimenea. Es utilizado para realizar la fusión del concentrado de cobre y separar la escoria, así como para la fundición de mineral y el refinado o la fusión de metales de bajo punto de fusión como el aluminio.
- **Balance estequiométrico:** Cálculo para una ecuación química balanceada que determinará las proporciones entre reactivos y productos en una reacción química
- **Factor de aireación:** Relación de las cantidades de aire y de combustible utilizadas durante la combustión.
- **Flujo másico:** Magnitud física que expresa la variación de la masa con respecto al tiempo en un área específica.
- **Energía:** Capacidad que tiene la materia de producir trabajo en forma de movimiento, luz, calor, entre otros.
- **Balance masa:** Contabilidad de entradas y salidas de masa en un proceso o de una parte de éste.
- **Balance energía:** Contabilidad de entrada y salida de energía en un proceso determinado.
- **PCS:** Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de masa de combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado y, por consiguiente, se tiene en cuenta el calor desprendido en este cambio de fase.
- **Calor específico:** la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia.
- **Coefficiente de convección Térmica:** parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo

- Coeficiente de expansión Volumétrica: la variación de la densidad de un fluido con la temperatura a presión constante.
- Numero de Grashof: representa la razón entre la fuerza de flotabilidad y la fuerza viscosa que actúan sobre el fluido, rige el régimen de flujo en la convección natural
- Numero de Prandtl: Describe la relación entre las capas límite de velocidad y capa límite térmica de un fluido.
- Numero de Nusselt: Representa el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa.
- Diagrama Sankey: Tipo específico de diagrama de flujo, en el que la anchura de las flechas se muestra proporcional a la cantidad de flujo, suele utilizarse para graficar el balance de energía de un proceso específico
- Eficiencia térmica: Coeficiente que indica la relación entre la energía útil y la energía utilizada para su generación

Los conceptos antes plasmados fueron obtenidos del libro *Transferencia de Calor y Masa* (Y. A. Çengel & Ghajar, 2009)

RESUMEN

La empresa Fundalco S.A.S proporciona a la comunidad soluciones integrales de fundición en aluminio y cobre, con el fin de preservar la calidad en sus productos y servicios, desarrolla estrategias que garanticen el correcto funcionamiento de los activos utilizados en las diferentes áreas de la empresa. El proceso de manufactura se divide en fundición, conformado, pulido y mecanizado, partiendo como activos primarios los hornos de fundición.

En el presente trabajo se realiza un diagnóstico energético del horno de fundición HFN004 destinado para el proceso de fundición en molde permanente. El análisis de dicho elemento se realiza mediante una medición de gases de combustión y fotografías termográficas, dicha información se utiliza para realizar un balance de masa y de energía, lo cual finalmente determina el estado energético de dicho horno, para así poder generar propuestas de mejora las cuales tienen como objetivo aumentar la eficiencia energética del activo, reducir pérdidas de energía al ambiente, reducir el consumo de gas natural y disminuir tiempos de producción.

Palabras Clave: Eficiencia, fundición, pérdidas. energía, aluminio.

ABSTRACT

The company Fundalco S.A.S provides the community with integral aluminum and copper casting solutions. In order to preserve the quality of its products and services, develops strategies that guarantee the correct operation of the instruments used in the different areas of the company. The manufacturing process is divided into melting, conformed, polishing and machining, with the melting furnaces starting as primary instruments.

In this work, it's developed an energy diagnosis of the HFN004 melting furnace, destined for the permanent mold melting process. The analysis of said element is carried out by a measurement of combustion gases and thermographic photographs, this information is used to do a balance of mass and energy, which ultimately determines the energy state of said furnace, in order to generate improvement proposals with the objective of increase the energy efficiency of the furnace, reduce energy losses to the environment, reduce natural gas consumption and decrease production times.

Keywords: Efficiency, melting process, lossess, energy, aluminum.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos treinta años, la empresa Fundalco S.A.S ha proporcionado soluciones integrales de fundición en aluminio y cobre a la comunidad. Como consecuencia al mejoramiento continuo de sus procesos y sus productos, esta compañía ha alcanzado un crecimiento significativo en el transcurso de los últimos cinco años, obteniendo cada vez más reconocimiento a nivel nacional e internacional.

Actualmente, en concordancia con el crecimiento y competitividad de la empresa dentro de la industria, esta se enfrenta a una alta demanda de productos caracterizados principalmente por su alta calidad. De acuerdo con esto y con el objetivo del mejoramiento continuo de la organización y sus servicios, se hace evidente la necesidad de intervenir variedad de procesos y elementos utilizados en la cadena de producción, entre otros, los hornos de fundición.

Los hornos tienen la tarea fundamental de llevar la materia prima a la temperatura ideal y precisa que sea requerida por cada uno de los procesos de fabricación utilizados en la empresa, esto es, inyección, fundición en arena o coquilla.

Sin embargo, a pesar de ser un elemento esencial para el desempeño de las actividades productivas de la empresa, apoyado en el análisis y evaluación exhaustiva del estado actual de los mismos, se han detectado importantes fugas calóricas que desencadenan una falla en el aislamiento térmico, lo que genera un alto e innecesario consumo de combustible.

En consecuencia, teniendo en cuenta lo anterior, se evidencia la necesidad de determinar opciones de mejoramiento que garanticen la más alta calidad de los productos desarrollados y fabricados

por la empresa, la disminución del tiempo de calentamiento, la reducción del consumo de combustible y el aumento de la productividad y utilidad netas; factores que a su vez mejorarán las condiciones laborales del personal operativo de la empresa, todo esto a través de un diagnóstico del desempeño térmico y ambiental de los hornos.

1 IDENTIFICACIÓN DE EMPRESA

Fundalco S.A.S es una empresa antioqueña que nace en 1987 con el fin de ofrecer soluciones en fundición de aluminio por diferentes procesos productivos como son:

- Moldeo por arena.
- Moldeo por molde permanente (Coquilla).
- Moldeo por inyección de alta presión.

Dicha empresa hace parte del sector industrial de fundición de metales no ferrosos, identificado con el código CIU 2432, la información general se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Información general de la empresa.

Nombre	Fundalco S.A.S
NIT	800012670-9
Dirección	Carrera 50 #77 Sur-194
Teléfono	(4) 373 09 74
Fax	(4) 291 26 71
Código Postal	055460003
Página web	www.fundalco.com

1.1 PLAN ESTRATÉGICO DE LA EMPRESA

MISIÓN

Somos una empresa de transformación de aluminio, que brinda soluciones integrales para el sector industrial nacional e internacional, mediante la innovación y estándares de calidad en pro de la generación de valor a nuestros grupos de interés.

VISIÓN

En el año 2020 FUNDALCO S.A.S será una organización empresarial en constante crecimiento, rentable, confiable y reconocida por su calidad, buenas prácticas empresariales, competitividad e innovación en el medio industrial, con soluciones de fundición de aluminio y conexos metalmecánicos.

1.2 PRODUCTOS PRINCIPALES

La empresa ofrece soluciones de fundición y fabricación de piezas en aluminio abarcando cuatro líneas de producción, estas se muestran en la Figura 1.

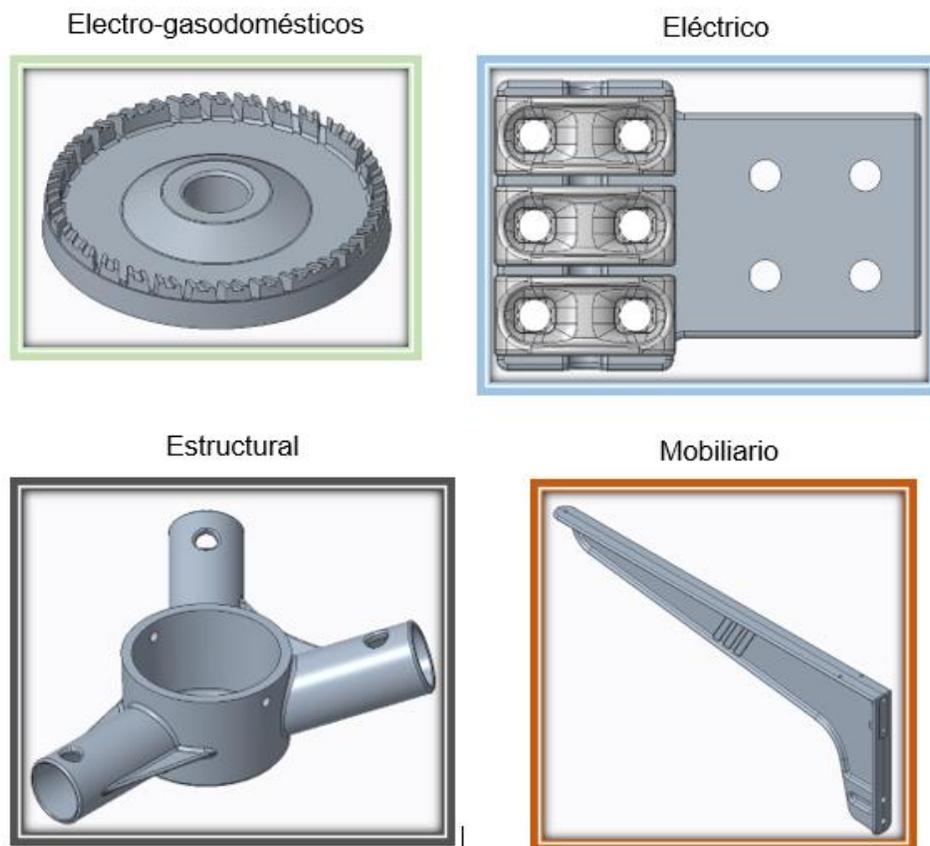


Figura 1 Productos principales de la empresa Fundalco S.A.S

2 PROBLEMÁTICA

Los hornos de fundición, como punto inicial de la cadena de producción de la compañía, son elementos fundamentales que deben permanecer en óptimas condiciones para el correcto desarrollo de los procesos de fabricación de los productos ofrecidos por la empresa a sus clientes. Teniendo esto presente y, siguiendo la visión empresarial, es vital realizar un diagnóstico energético de éstos y, en consecuencia, el planteamiento de posibles mejoras que permitan aumentar la calidad del producto, disminuir tiempos de calentamiento, menguar el consumo de combustible, optimizar la productividad y utilidad netas, así como mejorar las condiciones de trabajo del personal operativo de la empresa.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Realizar un diagnóstico de eficiencia energética y proponer procesos de mejoramiento dirigidos a los hornos de fundición de aluminio.

3.2 Objetivos específicos:

- Realizar balances de energía y masa a los hornos de fundición de aluminio con el fin de determinar oportunidades de optimización del funcionamiento de los mismos.
- Diseñar alternativas que permitan el aumento de la eficiencia energética de los hornos, la disminución de emisiones y la mejora de las condiciones de trabajo de los operadores de los hornos.
- Identificar una tecnología que vaya acorde con las necesidades específicas que enfrenta la empresa a la hora de mejorar la capacidad productiva de sus hornos.
- Realizar un presupuesto para la ejecución de los cambios que se encuentren necesarios, teniendo en cuenta especificaciones técnicas prioritarias para los materiales de fabricación, componentes generales del proyecto y obras civiles que resulten esenciales.

4 MARCO TEÓRICO

La fundición nace de la necesidad de desarrollar elementos o utensilios con formas definidas para el hogar y la guerra. Esto conlleva a un cambio en la concepción de la metalurgia generando mezclas de elementos con el fin de obtener diferentes metales con propiedades específicas, facilitando los diferentes procesos relacionados con la vida del ser humano.

Inicialmente, la fundición y fusión de metales fue efectuada en hornos rudimentarios; un espacio cerrado, de metal o cerámico, donde se lleva a cabo el calentamiento de los cuerpos y metales con el fin de elevar la temperatura del material hasta lograr un cambio de estado físico de sólido a líquido. Luego, esta mezcla líquida será depositada en un molde que le brindará una forma y cualidades específicas a través de las cuales obtendrá nuevas funcionalidades además de aumentar su valor comercial.

Hoy en día, para llevar a cabo estos procesos, existen diferentes tipos de hornos, diferenciados entre sí gracias al tipo de calentamiento, eficiencia energética y calidad del material fundido. Generalmente, para la fundición de aluminio son utilizados hornos de calentamiento eléctrico o de gas, que pueden alcanzar temperaturas superiores a 660°C. A continuación, se presentan algunos de ellos:

4.1 Hornos convencionales

- Horno de crisol: Es un tipo de horno caracterizado por utilizar combustibles fósiles para efectuar su proceso de calentamiento, generalmente gas natural. El aumento de temperatura se realiza de manera indirecta, dado que los gases de combustión no entran

en contacto con el material a fundir; por el contrario, entran en contacto con el crisol - un dispositivo fabricado generalmente de grafito y arcilla- capacitado para soportar temperaturas mayores a 1300°C, este alberga el material a fundir, generando el cambio de fase por conducción y radiación. Un ejemplo de este se puede observar en la Figura 2. (Calvo, 2015)

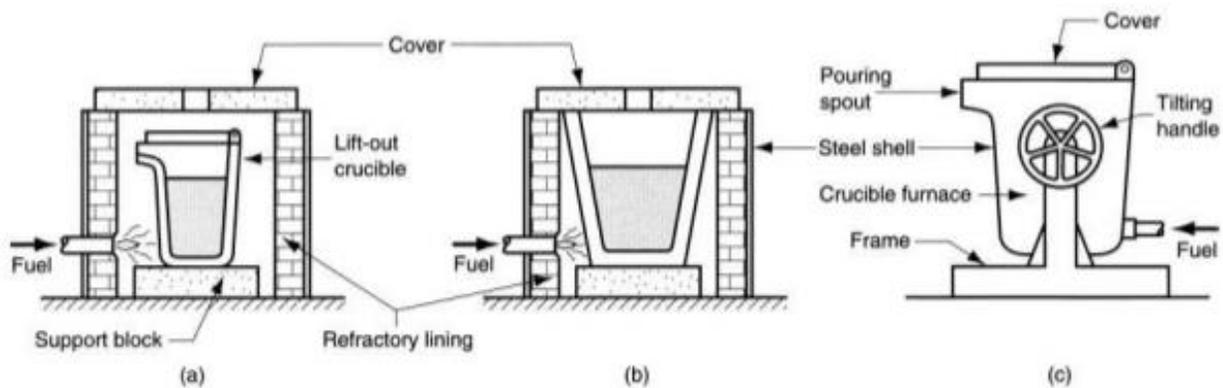


Figura 2 Horno de crisol a gas natural. *Figura tomada de* (Calvo, 2015)

- Horno de inducción: Este tipo de horno se distingue debido a que el aumento de temperatura se genera gracias a la inducción electromagnética, provocada por bobinas dispuestas alrededor del crisol que contiene el material a fundir, dichas bobinas (alimentadas por energía eléctrica) generan un campo electromagnético, que provoca una fuerza electromotriz dentro del material, lo cual incrementa la temperatura de este, alcanzando así el cambio de fase deseado, un esquema de esto se puede observar en la Figura 3. (Universidad Nacional Autónoma de México, 2008)

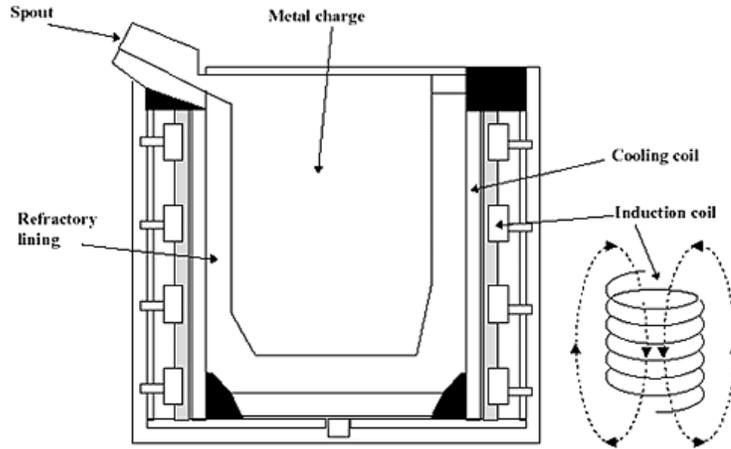


Figura 3 Esquema horno inducción. Figura tomada de (“HLQ INDUCTION EQUIPMENT CO.,LTD,,” 2015)

- Horno de resistencia: Este tipo de dispositivo utiliza la radiación y conducción como elementos para aumentar la temperatura del material a fundir. Dicha energía proviene de resistencias eléctricas las cuales, a través del efecto *joule* generan mecanismos de transferencia de calor antes mencionados. Lo anterior se representa en la Figura 4.(Calvo, 2015)

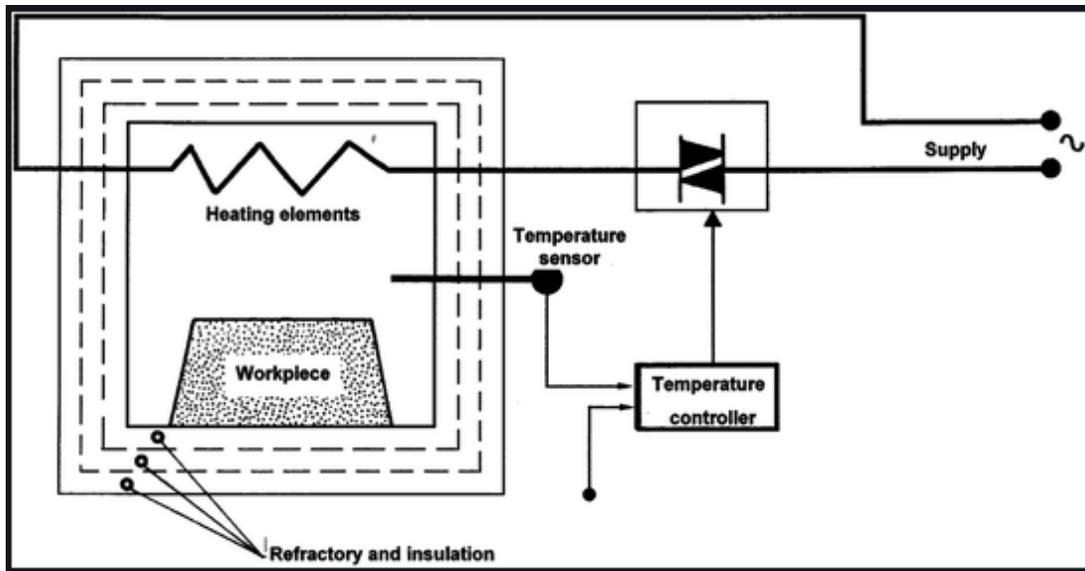


Figura 4 Diagrama de horno de resistencia. Figura tomada de (Lupi, 2017)

- Horno de reverbero: Horno cubierto internamente por una bóveda de ladrillo refractario, que refleja el calor generado por la llama del quemador; por lo general la fuente de energía térmica se encuentra ubicada en una cámara diferente al lugar donde se encuentra el material a fundir o en la zona alta del horno, por lo cual el calentamiento se considera indirecto, dado que los gases de combustión no entran en contacto con el material; el aumento de temperatura se da por radiación y conducción, el diagrama de funcionamiento se observa en la Figura 5.(Nathan & Scobell, 2012)

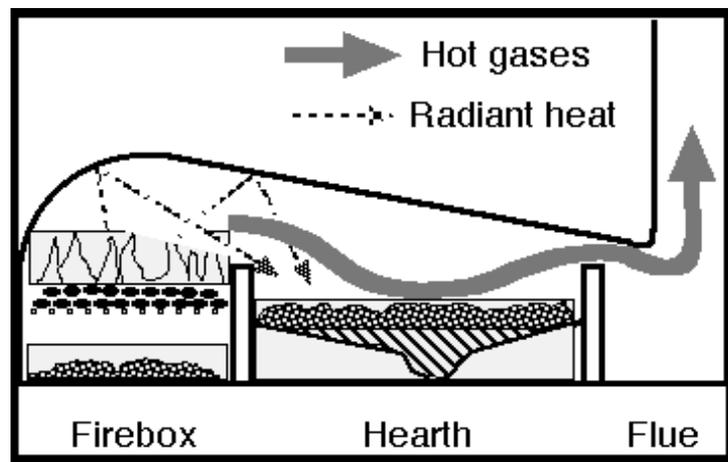


Figura 5 Esquema funcionamiento horno de reverbero. *Figura tomada de* ("Wikipedia," 2001)

Los principales aspectos a tener en cuenta para escoger el tipo de horno y fuente de energía son:

- Calidad de masa fundida.
- Eficiencia energética requerida.
- Fuente energía de fácil acceso o de costo viable
- Temperatura de fusión del material a tratar.
- Cantidad de producción mínima requerida.

4.2 Horno de fundición de alta eficiencia.

- Horno de Crisol Auto-Regenerativo: Este artefacto es similar al horno de crisol convencional alimentado por gas natural; se diferencia de este debido al uso de un quemador auto regenerativo, es decir, posee un sistema que retiene el calor proveniente de los gases de combustión en una matriz cerámica, que posteriormente es transferido al aire de combustión. Este proceso se ejecuta de manera cíclica como se observa en la Figura 6. Este precalentamiento puede lograr un ahorro de combustible cercano al 50% en comparación con un horno de fundición convencional. (Amell & Cadavid, 2013) (Andres, 2019)

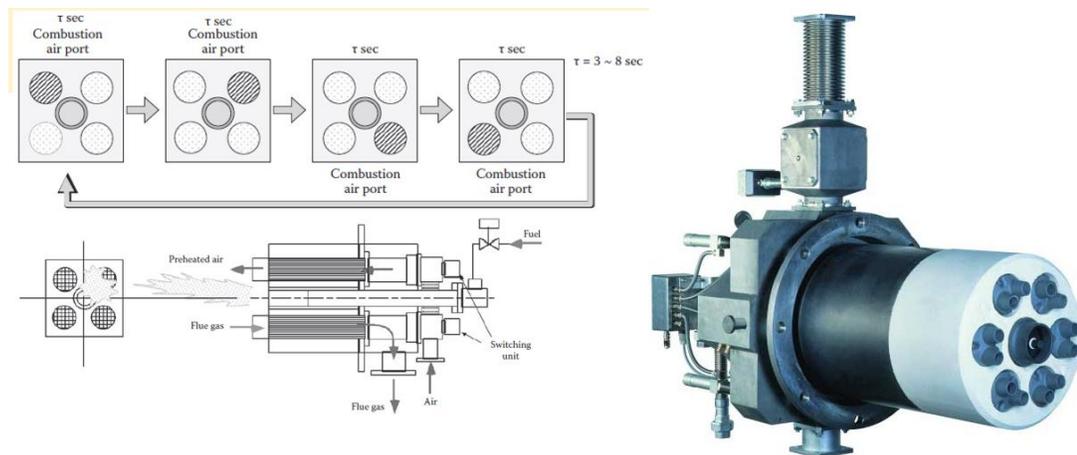


Figura 6 Secuencia de operación de quemador auto regenerativo. Figura tomada de (Amell & Cadavid, 2013)

- Hornos con Sistemas de Regeneración: Estos hornos poseen un sistema fundamentado en pares de quemadores con sistema de intercambio de calor entre el gas de combustión y el aire de combustión. Esto es llevado a cabo a través de una operación de alternación de un par de quemadores en una serie de ciclos de periodo fijo: los humos de combustión generados por el primer quemador, se extraen por el segundo quemador de la pareja, precalentando un mediador, normalmente constituido por un tanque lleno con el material,

fabricado en cerámica de varias formas y tamaños. En el siguiente ciclo, la operación se invierte de manera que, el aire de combustión que se envía al quemador se calienta previamente por el calor acumulado de la cama del quemador de cerámica, mismo que funcionaba como una chimenea en el ciclo anterior. (Todo esto se puede observar gráficamente en la Figura 7.) Dependiendo del tamaño y de las condiciones de uso, este tipo de quemador asegura una disminución sustancial en el consumo, en comparación con quemadores tradicionales con suministro de aire a temperatura ambiente. Se diferencia del Horno Auto Regenerativo debido a que en este, el quemador realiza el proceso de combustión e intercambio de calor simultáneamente, requiriendo menos espacio y solo un quemador para realizar el precalentamiento y ahorro en consumo deseado. (Pyronics International s.a., 2012)

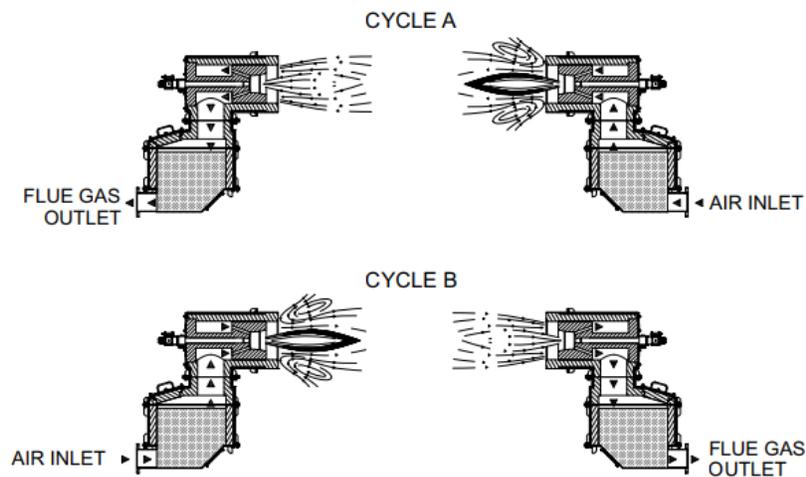


Figura 7 Ciclo de regeneración. *Figura tomada de* (Pyronics International s.a., 2012)

- Hornos Auto Recuperativos: Hornos de fundición equipados con un quemador auto recuperativo, poseen un intercambiador de calor gas – gas incorporado en el cuerpo del quemador, lo cual permite entregar parte de la energía sensible de los productos de combustión al aire de combustión que ingresa al sistema. Estos quemadores cuentan con un sistema de eyección que permiten la extracción de los gases a través del mismo quemador. A diferencia de los quemadores regenerativos, los quemadores recuperativos no

trabajan en ciclos, por lo que el sistema de control es más simple además de no contar con lechos cerámicos. Gracias a esta simplicidad, los quemadores recuperativos tienen menores costos de inversión que los quemadores regenerativos; sin embargo, su efectividad de recuperación de calor es menor en comparación con los quemadores regenerativos, el esquema de funcionamiento se puede observar en la Figura 8 .(Pyronics International s.a., 2012)

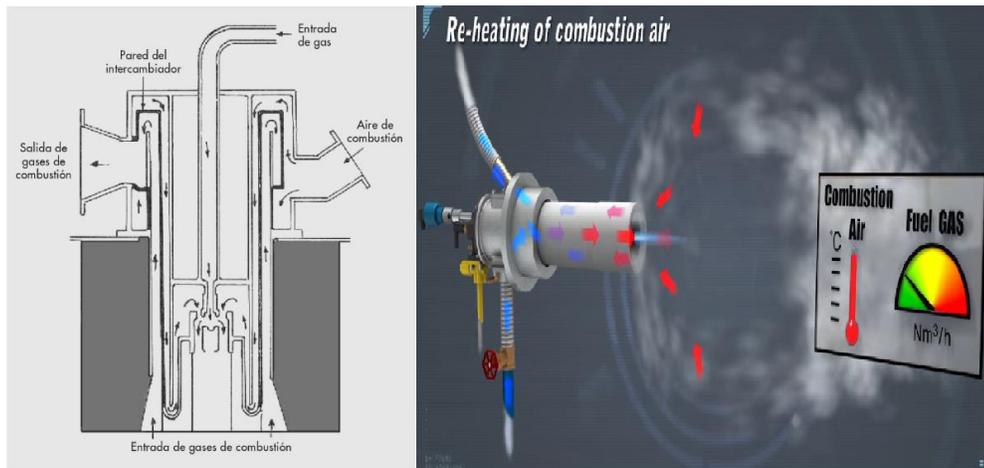


Figura 8 Esquema de quemador auto recuperativo. *Figura tomada de (Auto-recuperativos, n.d.)*

5 CARACTERIZACIÓN DE PROCESO A ALTA TEMPERATURA

5.1 Metodología

Actualmente, la empresa Fundalco S.A.S cuenta con una capacidad de fundición de 1865 kg, debido a la Resolución 619 de 1997 no debe superar los 2000 kg, pues si esto sucede se hace necesaria la consecución de diferentes permisos que no son de interés vital para la compañía hoy en día. Debido a esto, se busca reducir la capacidad de fundición a dos hornos que posean las mismas características físicas con el fin de que sea posible operarlos de manera simultánea para diferentes áreas de la zona de conformado; de los cuales sólo uno se encuentra activo.

De acuerdo con lo anterior, el diagnóstico se efectúa focalizado en el horno que se encuentra en operación, el cual está designado para el área de conformado en coquilla y se conoce por el código HFN004 observado en la Figura 9.



Figura 9 Horno de coquilla HFN004

Para realizar el diagnóstico energético deseado se debe realizar un análisis de gases de escape y registro de temperatura de las paredes y entorno del horno.

5.2 Consideraciones

Para el combustible utilizado en los próximos cálculos se tomará como referencia la composición química y propiedades físicas reportadas por *Promigas S.A* del gas natural de la Guajira para el periodo 2020-1, esta se muestra en la Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 2 Composición de gas natural de la Guajira para el 2020-1(“PROMIGAS S.A,” n.d.)

COMPONENTE	FÓRMULA	COMPOSICIÓN PORCENTAJE MOLAR
Metano	CH ₄	83.448
Nitrógeno	N ₂	0.564
Dióxido de carbono	CO ₂	1.844
Etano	C ₂ H ₆	9.629
Propano	C ₃ H ₈	3.349
i-butano	C ₄ H ₁₀	0.505
n-butano	C ₄ H ₁₀	0.491
i-Pentano	C ₅ H ₁₂	0.091
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	0.046
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	0.028

Tabla 3 Propiedades físicas de gas natural (“PROMIGAS S.A,” n.d.)

Propiedad	Valor	Unidad
Gravedad específica real	0.673	
Poder calorífico superior	50306.70	<i>kJ/kg</i>
Densidad	0.672	<i>kg/m³</i>

Las propiedades expuestas en la Tabla 3 fueron tomadas en condiciones estándar, es decir, a una temperatura de 15.6 ° C y una presión atmosférica de 85.5 kPa.

6 BALANCE DE MASA

Para realizar el balance de masa es necesario conocer todos los componentes que interactúan en el horno, eso se muestra en la Figura 10. El procedimiento utilizado se realiza con base al libro *Transferencia de Calor y Masa* (Y. A. Çengel & Ghajar, 2009)

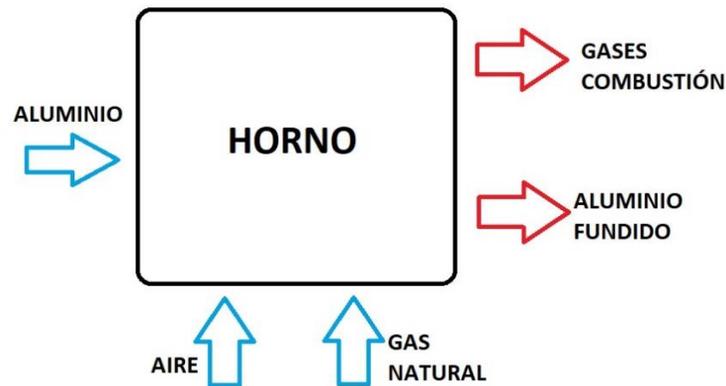


Figura 10 Esquema de proceso de horno HFN004

Debido a diferentes factores se dificulta realizar un análisis de gases, por lo cual se toma como referencia un reporte realizado por la unión temporal *INCOMBUSTION* en el cual se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 4 Composición de gases de escape HFN004(INCOMBUSTION, 2017)

Compuesto	Concentración
Monóxido de carbono (CO)	4000 ppm
Oxígeno (O ₂)	4.6%
Dióxido de azufre (SO ₂)	107 ppm
Monóxido de nitrógeno (NO)	32.34 ppm
Temperatura gases	535.08°C

6.1 Balance estequiométrico ideal y real

Para el análisis de sistemas de combustión es fundamental conocer la relación de aire-combustible, dado que el control de este determina un desempeño adecuado del sistema. Como referencia se parte de la mínima cantidad de aire necesaria para que se desarrolle una combustión completa, esta se encuentra realizando el balance estequiométrico utilizando los valores principales del combustible expuesto en la Tabla 2, esto para luego ser comparado con el balance estequiométrico real, encontrando así el desempeño de la combustión en el horno HFN004, este procedimiento se expone en la Tabla 5 y Tabla 6.

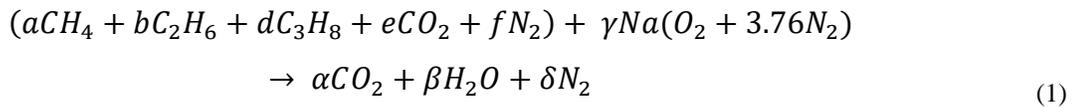
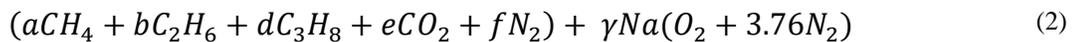


Tabla 5 Valores de balance estequiométrico ideal.

Reactivos		Productos	
<i>a</i>	0.8345	<i>α</i>	1.1943
<i>b</i>	0.0963	<i>β</i>	2.1518
<i>d</i>	0.0335	<i>δ</i>	8.5417
<i>e</i>	0.0301		
<i>f</i>	0.0056		
<i>γNa</i>	2.2702		

Luego se realiza el mismo procedimiento añadiendo la composición de gases de escape expuesta en la Tabla 4.



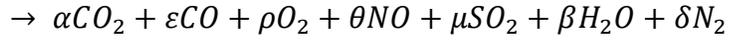


Tabla 6 Valores balance estequiométrico real

Reactivos		Productos	
<i>a</i>	0.8345	α	1.1943
<i>b</i>	0.0963	ε	0.0046
<i>d</i>	0.0335	ρ	0.046
<i>e</i>	0.0301	θ	3.2E-05
<i>f</i>	0.0056	μ	1.07E-04
γNa	2.2824	β	2.1518
		δ	8.5417

6.2 Exceso de aire

Para el balance estequiométrico ideal el factor $\gamma = 1$, se desea conocer este valor en el balance estequiométrico real con el fin de determinar el exceso de aire que presenta la combustión, el procedimiento se expone a continuación en la Tabla 7.

$$\text{Exceso de aire}[\%] = (\gamma - 1)100 \quad (3)$$

Tabla 7 Exceso de aire

Na_{stq}	2.2702
γNa_{stq}	2.8224
γ	1.2422
Exceso aire	24.22 %

El exceso de aire recomendado para este tipo de horno se encuentra entre el 10% y el 15% (Agencia Andaluza de la Energía, 2011)

6.3 Factor de aireación

Con los datos obtenidos se realiza el cálculo del factor de aire estequiométrico como se ve a continuación:

$$A/F = \frac{Na(4.76)M_a}{M_{fuel}} \quad (4)$$

Peso molecular aire (M_a) = 29 kg/kmol

Peso molecular combustible (M_{fuel}) = 19.38 kg/kmol

Utilizando la ecuación (4) se obtiene el factor de aireación ideal y real del proceso de combustión que ocurre dentro del horno HFN004, esto se observa en la Tabla 8.

Tabla 8 Relación aire-combustible

RELACIÓN AIRE COMBUSTIBLE HORNO HFN004	
A/F ESTEQUIOMÉTRICO	15.52
A/F REAL	19.28
EXCESO AIRE	24.2%

Este factor indica la cantidad de kilogramos de aire necesarios por un kilogramo de combustible necesario para que se realice la combustión.

6.4 Balance de masa

Conocido el poder calorífico del combustible y la potencia de operación del quemador se obtiene el flujo másico de combustible utilizado, se observa a continuación.

$$\text{Potencia térmica} = \dot{m}_c PCS \quad (5)$$

$$\dot{m}_c = \frac{PCS}{\text{Potencia térmica}} \quad (6)$$

Con el flujo másico de combustible y el factor de aireación se encuentra el flujo másico de aire

$$\dot{m}_a = \dot{m}_c A/F \quad (7)$$

El horno tratado opera 24 horas al día, siete días a la semana, por lo cual se toma el flujo de materia prima promediando el consumo mensual del horno el cual es de 30 toneladas aproximadamente.

Además, el flujo de cada componente en la chimenea se obtiene de la siguiente manera

$$\dot{M}_{gases} = \dot{m}_c + \dot{m}_a \quad (8)$$

$$\dot{M}_{gi} = \dot{M}_{gases}(Y_{mi}) \quad (9)$$

$$Y_{mi} = \frac{X_i M_i}{M_g} \quad (10)$$

Y_{mi} = Fracción másica

X_i = Fracción molar

M_i = Peso molecular de la especie

M_g = Peso molecular de los gases de combustión

Utilizando toda la información anterior se obtiene el balance de masa presente en el horno HFN004 expresado en la Tabla 9.

Tabla 9 Balance de masa.

POTENCIA QUEMADOR 63 kW		
Compuesto	Entrada [kg/s]	Salida [kg/s]
GN	0,001258679	-
Aire	0,024268897	-
Aluminio	0,011701613	0,011701613
Gases de escape	-	0,025527576
CO_2		0,003298612
CO	-	8,18491E-06
O_2	-	0,001061333
NO	-	6,11367E-08
H_2O	-	0,00244067
SO_2	-	4,31524E-07
N_2	-	0,018718283

7 BALANCE DE ENERGÍA

Como lo anuncia la primera ley de la termodinámica “*la energía no se crea ni se destruye, se transforma*”,(Y. A. B. A. M. Çengel, 1965) por lo tanto la energía que es suministrado por el combustible con el fin de cambiar de fase la materia prima utilizada, se transforma en diferentes tipos de energía, las cuales se expondrán en este apartado. Las ecuaciones utilizadas en esta sección se obtuvieron del libro *Transferencia de Calor y Masa* (Y. A. Çengel & Ghajar, 2009).

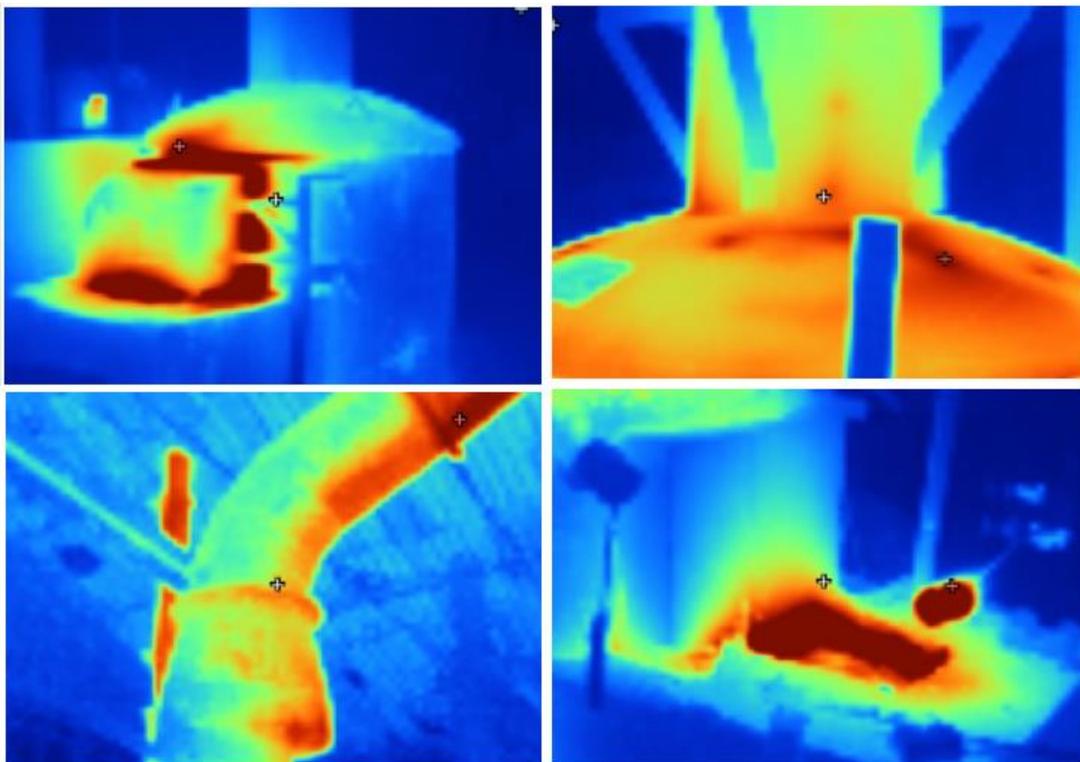


Figura 11 Termografías del horno HFN004 con cámara termográfica profesional Testo 885-2

7.1 Energía del proceso

Esta energía es la requerida para llevar el aluminio de su estado sólido a la fase líquida con la temperatura adecuada para su operación en las distintas formas de conformado que posee la compañía, dicho proceso se divide en tres fases:

- Energía requerida para elevar la temperatura del aluminio a la temperatura de fusión del material.
- Energía necesaria para realizar el cambio de fase de estado sólido a líquido del material.
- Energía utilizada para elevar la temperatura del aluminio en fase líquida a la temperatura de operación.

Las tres fases anteriores se pueden resumir en la ecuación (11)

$$E_{proceso} [kW] = \dot{m}_{aluminio} \left[\left(Cp_s (T_f - T_o) \right) + Hf_{sl} + \left(Cp_l (T_p - T_f) \right) \right] \quad (11)$$

$$\dot{m}_{aluminio} = \text{Flujo másico del aluminio} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$Cp_s = \text{Calor específico del aluminio sólido} \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

$$Cp_l = \text{Calor específico del aluminio líquido} \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

$$T_f = \text{Temperatura de fusión del aluminio} [^{\circ}C]$$

$$T_o = \text{Temperatura ambiente} [^{\circ}C]$$

$$T_p = \text{Temperatura de operación} [^{\circ}C]$$

$$Hf_{sl} = \text{Entalpia de fusión del aluminio} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

7.2 Energía perdida

Es considerada energía perdida a toda aquella energía que no se está aprovechando para un fin determinado, en este caso se divide en cuatro.

7.2.1 Vaporización del agua.

La energía utilizada en vaporizar el agua que se forma en el proceso de combustión, estaría determinada bajo la ecuación (12)

$$E_{H_2O}[kW] = Q_{H_2O} - Q_{aire} \quad (12)$$

$$Q_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O_{gases}} \left[(Cp_{H_2O}(T_g - T_o)) + H_{fg} \right] \quad (13)$$

$$Q_{aire} = \dot{m}_{aire} Cp_{aire}(T_a - T_o) \quad (14)$$

$$\dot{m}_{H_2O_{gases}} = \text{Flujo másico de } H_2O \text{ en los gases de combustión } \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$\dot{m}_{aire} = \text{Flujo másico de aire utilizad en la combustión } \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$Cp_{aire} = \text{Calor específico de aire } \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

$$Cp_{H_2O} = \text{Calor específico de vapor de } H_2O \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

$$H_{fg} = \text{Entalpía de vaporización } H_2O \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$T_g = \text{Temperatura de gases } [^{\circ}C]$$

$$T_{aire} = \text{Temperatura de aire que ingresa a la combustión } [^{\circ}C]$$

$$T_o = \text{Temperatura ambiente } [^{\circ}C]$$

7.2.2 Inquemados.

La energía que no fue utilizada debido a que el carbono presente en el combustible no reacciona por completo con el oxígeno.

$$E_{CO}[kW] = \dot{m}_{CO} \left[\left(C_{p_{CO}}(T_g - T_o) \right) + P_{C_{CO}} \right] \quad (15)$$

$$\dot{m}_{CO} = \text{Flujo másico de CO en gases de combustión} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$C_{p_{CO}} = \text{Calor específico de CO} \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

$$P_{C_{CO}} = \text{Entalpia de CO} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

7.2.3 Gases de combustión.

La energía que poseen los gases de combustión y no es aprovechada para un uso secundario, conocida como el calor sensible de los gases.

$$E_{gases}[kW] = \sum m_{g_i} C_{p_i}(T_g - T_o) \quad (16)$$

$$m_{g_i} = \text{flujo másico de cada especie presente en los gases} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$C_{p_i} = \text{Calor específico de cada especie presente en los gases} \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

En esta energía se excluye la presencia del CO debido a que ya se tuvo en cuenta en la sección 7.2.2

7.2.4 Paredes.

Aquella energía que se disipa al ambiente en forma de calor debido los procesos de convección y radiación que se genera debido a las altas temperaturas del proceso. Debido a que el horno se encuentra dentro de un ambiente cerrado sin vientos forzados, se considera que se presenta una convección natural.



Figura 12 Disposición horno HFN004

$$E_{pared} [kW] = E_{techo} + E_{cuerpo} + E_{entrada} + E_{salida} + E_{chimenea} \quad (17)$$

Las energías expresadas en la ecuación (17) se refieren a la energía que se transmite al ambiente cada una de las partes físicas del horno las cuales se muestran en la Figura 12. Cada una de las energías consta del resultado de la ecuación (18)

$$E_i [kW] = Q_{convección} + Q_{radiación} \quad (18)$$

La energía proveniente de la convección y radiación requiere los datos expresados a continuación. La ecuación (24) corresponde a la correlación de placas verticales para todo el intervalo de Ra , esta ecuación puede ser utilizada para cilindros verticales siempre y cuando se cumpla la ecuación (19), lo cual corresponde para este caso dado que $D = 4 \text{ m}$ y $D \geq 0,284$.

$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{\frac{1}{4}}} \quad (19)$$

$$Q_{convección} [kW] = \frac{hA_s(T_s - T_o)}{1000} \quad (20)$$

$$Q_{radiación} [kW] = \frac{\varepsilon\sigma A_s(T_s^4 - T_o^4)}{1000} \quad (21)$$

$$Ra = Gr Pr \quad (22)$$

$$Gr = \frac{gB(T_s - T_o)L_c^3}{\nu^2} \quad (23)$$

$$Nu = \left[0.825 + \frac{0.387Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right]^2 \quad (24)$$

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (25)$$

$$h = \frac{Nu k}{L_c} \quad (26)$$

$A_s = \text{Área Superficial [m}^2\text{]}$

$h = \text{Coeficiente de convección térmica } \left[\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \right]$

$\sigma = \text{Coeficiente de Stefan – Boltzman } \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$

$B = \text{Coeficiente de expansión volumétrica } \left[\frac{1}{K} \right]$

$\nu = \text{Viscosidad cinemática del fluido } \left[\frac{m^2}{s} \right]$

$k = \text{Conductividad térmica del fluido } \left[\frac{W}{m \text{ } ^\circ\text{C}} \right]$

$Nu = \text{Numero de Nusselt}$

$L_c = \text{Longitud característica [m]}$

$\varepsilon = \text{Emisividad de material}$

$Ra = \text{Numero de Rayleigh}$

$Gr = \text{Numero de Grashof}$

$Pr = \text{Numero de Prandtl}$

8 RESULTADOS

Utilizando la información de las Tabla 9 y Tabla 10, así mismo las ecuaciones antes expresadas se obtiene finalmente el balance de energía, para dicho cálculo se supuso un estado estable y estacionario, con este balance se comunica el estado de operación del horno en la Tabla 11, Figura 13 y Figura 14.

Tabla 10 Variables utilizadas en balance de energía

Variables	Valor	Unidad
$h_{chimenea}$	4,688	$W/m^2\text{°C}$
h_{cuerpo}	4,773	$W/m^2\text{°C}$
$h_{entrada}$	6,095	$W/m^2\text{°C}$
h_{salida}	6,047	$W/m^2\text{°C}$
$T_{chimenea}$	79,7	°C
T_{cuerpo}	83,88	°C
$T_{entrada}$	215	°C
T_{salida}	245	°C
T_{gases}	535,08	°C
T_o	22	°C
e	0,5	
P_{atm}	85,3	kPa
Cp_l	1,18	kJ/kgK
Cp_s	0,903	kJ/kgK
Hf_{sl}	386,9	kJ/kg
P_{co}	10106	kJ/kg
Cp_{vap}	2,158	kJ/kgK
Hf_g	2449	kJ/kg
Cp_{H_2O}	2,158	kJ/kgK

Cp_{CO}	1,046	kJ/kgK
Cp_{CO_2}	1,172	kJ/kgK
Cp_{N_2}	1,124	kJ/kgK
Cp_{NO}	1,195	kJ/kgK
Cp_{SO_2}	0,8205	kJ/kgK
Cp_{O_2}	1,052	kJ/kgK
PCS	50307	kJ/kg

Tabla 11 Balance energía horno HFN004 (F-Chart Software, 2015)

Descripción		Potencia [kW]	Porcentaje		
Entrada	Combustible	63	100%		
Salida	Proceso	Fundición Aluminio	11,82	19%	
	Perdidas	Vaporización Agua	2,467	4%	
		Inquemados	0,02476	0,04%	
		Calor sensible	6,262	10%	
		Paredes	Convección	16,74	27%
			Radiación	26,01	41%

$$\eta[\%] = \frac{E_{proceso}}{\dot{m}_{fuel} PCS} 100 = 18,66\% \quad (27)$$

Utilizando la ecuación (27) se obtiene la eficiencia térmica global del horno, la cual corresponde a un 18,66%.

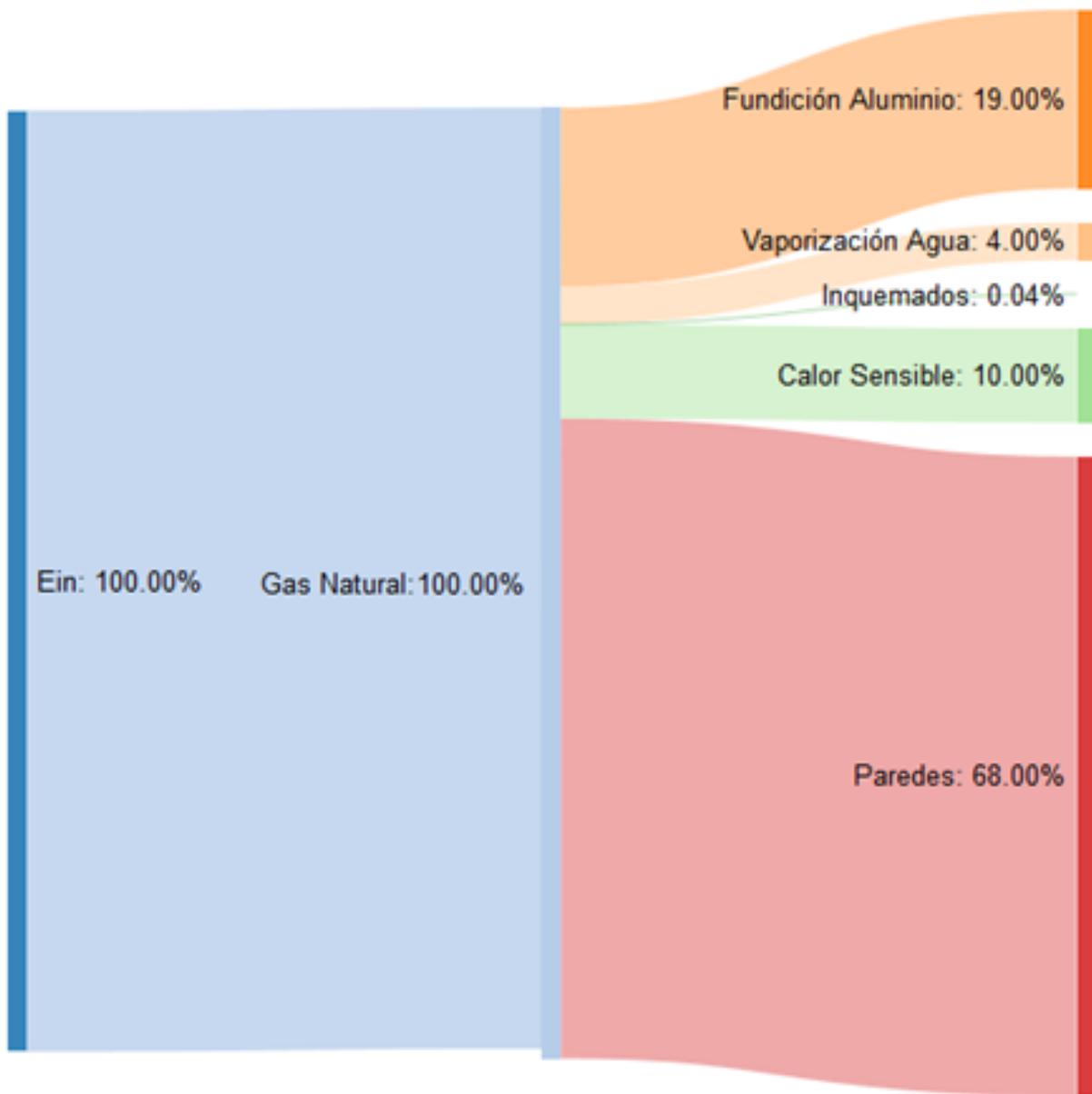


Figura 13 Diagrama Sankey del proceso

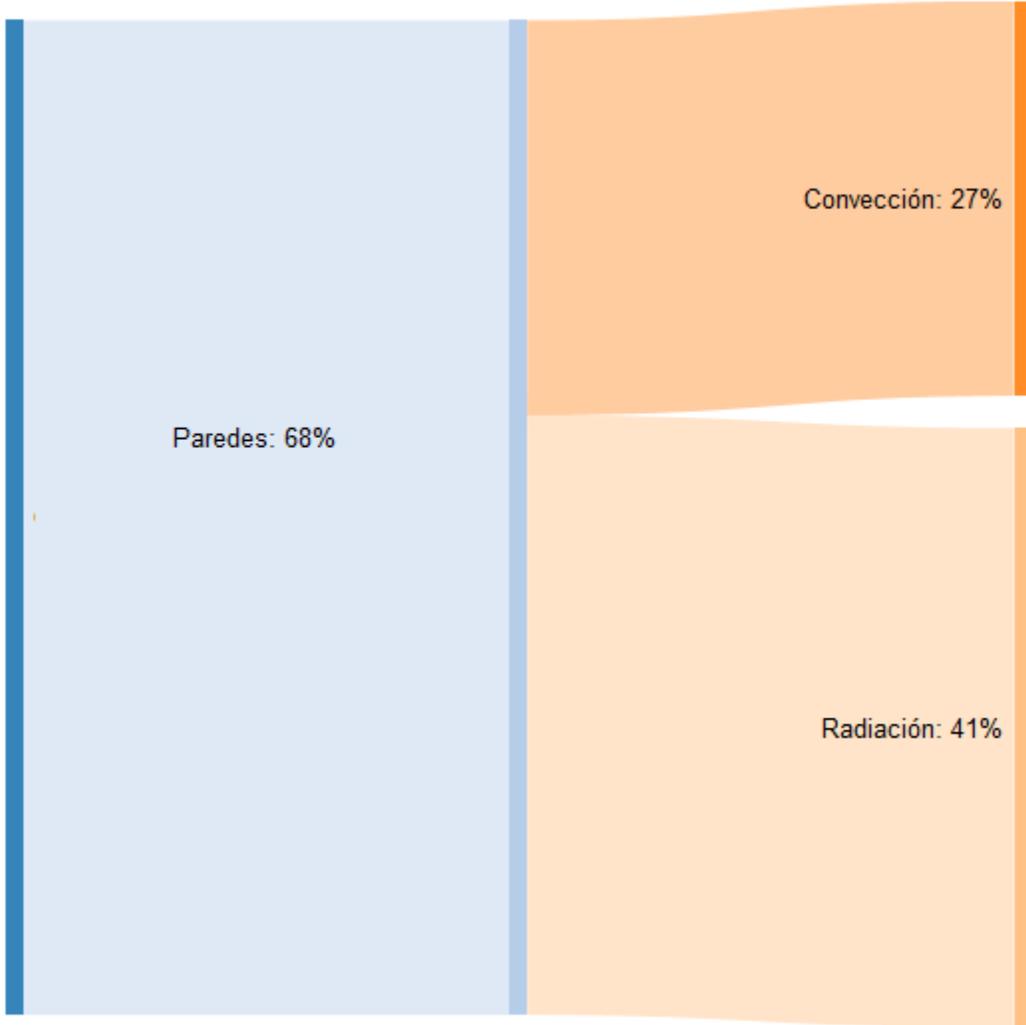


Figura 14 Distribución de energía perdida por paredes

9 DIAGNÓSTICO

Observando los resultados de la Tabla 11 y Figura 13 se puede concluir que las mayores pérdidas de calor se ven reflejadas en los procesos de convección y radiación a los que las paredes del horno están sometidas, se da en un 27% y 41% respectivamente. Esto producto de una deficiencia en el sistema de aislamiento del sistema.

Además, la energía proveniente del calor sensible de los gases de combustión es otra fuente de pérdida con un 10%. El origen de esta pérdida es debido a la salida de los gases de combustión a una temperatura elevada de 535.08 °C, así mismo un exceso de aire de 24.2%, un valor que según la literatura debe de encontrarse entre 10%-15% (Agencia Andaluza de la Energía, 2011).

La energía perdida debido a la vaporización del agua e inquemados presentes en los gases de combustión son valores esperados para equipos que no poseen sistemas de recuperación de calor por condensación ni regulación de la relación aire combustible. Sin embargo, las pérdidas en estas áreas son despreciables en comparación con las presentadas por el calor sensible y la emisión de calor de las paredes del horno.

10 OPCIONES DE MEJORAMIENTO

Dado que se desea modificar el horno HFN004 para reducir su capacidad de fundición en conjunto con el diagnóstico expuesto en el apartado 9, se plantea como propuesta de mejora un rediseño del horno actual enfocándolo en disminuir la mayor cantidad de pérdidas de energía posibles.

10.1 Aislamiento y material refractario

Las mayores pérdidas registradas se dan por efectos de convección y radiación debido a la temperatura superficial que obtiene la estructura externa del horno producto de un aislamiento poco adecuado. Realizando un circuito de resistencia térmica se determina la cantidad adecuada de aislamiento. Manta cerámica y cemento refractario serán los materiales a utilizar para este proceso, puesto que la fundición del material es exitosa a pesar de las pérdidas de energía la cantidad del material refractario se tornará constante con un espesor de 15 cm y solo se procede a modificar el aislamiento.

En la Figura 15 se muestra el circuito de resistencia a tratar, se considera la temperatura T_1 constante con un valor de 800°C como la máxima temperatura a la cual se encontrará expuesto en el proceso de fundición y la temperatura T_3 constante a un valor de 60°C , además, el valor de la l

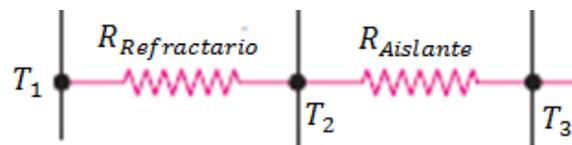


Figura 15 Circuito de resistencias térmicas

$T_1 = \text{Temperatura interna del horno } [^{\circ}\text{C}]$

$T_2 =$ Temperatura superficial externa de horno [$^{\circ}C$]

$R_{Refractario} =$ Resistencia Térmica del Material refractario [$\frac{^{\circ}C}{W}$]

$R_{Aislante} =$ Resistencia Térmica del Material Aislante [$\frac{^{\circ}C}{W}$]

$$Q = \frac{\Delta T^{\circ}}{R_{total}} \quad (28)$$

$$R_{total} = R_{Refractario} + R_{Aislante} \quad (29)$$

$$R_{Refractario} = \frac{L_{Refractario}}{K_{Refractario} A_{Refractario}} \quad (30)$$

$$R_{Aislante} = \frac{L_{Aislante}}{K_{Aislante} A_{Aislante}} \quad (31)$$

Utilizando las ecuaciones (28) a la (31) se llega a determinar la longitud óptima del material aislante como se observa en la siguiente ecuación:

$$L_{Aislante} = \frac{\Delta T^{\circ} (K_{Refractario} A_{Refractario} K_{Aislante} A_{Aislante})}{Q (K_{Refractario} A_{Refractario})} - \frac{K_{Aislante} A_{Aislante} L_{Refractario}}{K_{Refractario} A_{Refractario}} \quad (32)$$

$K_i =$ Conductividad térmica del material [$\frac{W}{m^{\circ}C}$]

$A_i =$ Área específica del material [m^2]

Utilizando las ecuaciones (28) a (32) se determina que el espesor del aislamiento optimo seria de 30 cm lo cual sería un claro aumento, puesto que actualmente se utiliza un espesor de 12.5 cm. Además, se recomienda por parte de la empresa *Termaltec S.A* un tiempo de curado de mínimo 24 horas para el refractario, esto con el fin de que se obtenga un mejor rendimiento y se eviten

desprendimiento de material que afecte la materia prima. Se puede observar en la Figura 16 la proporción de los componentes siendo el amarillo el aislamiento, rojo el material refractario y por último el azul corresponde a la materia prima.

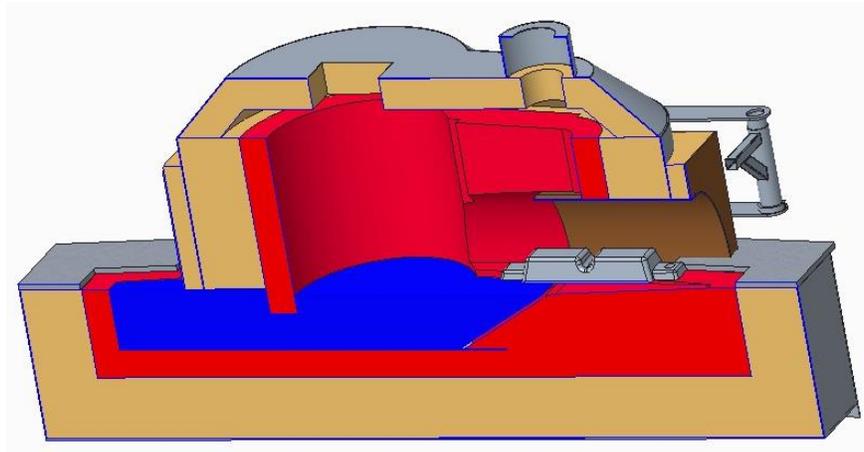


Figura 16 Aislamiento y material refractario de horno HFN004

10.2 Pre calentamiento de materia prima

Los gases de combustión son expulsados a una temperatura de $535.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ como lo expresa la Tabla 4. Estos gases pueden ser utilizados para precalentar los lingotes de aluminio antes de ser fundidos, disminuyendo las pérdidas de calor sensible y la energía utilizada para el proceso de fundición. Para realizar esto se debe ejecutar una modificación física en el horno, trasladando la salida de los gases con el fin de que estos entren en contacto con la materia prima, dicha modificación además aumentara la seguridad de operación para el personal encargado dado que se evitan posibles accidentes asociados al contacto de la materia prima a temperatura ambiente con el aluminio fundido a $720\text{ }^{\circ}\text{C}$, este choque térmico provoca un efecto de salpicadura del aluminio fundido generando quemaduras en el personal de operación. La propuesta de diseño se puede observar en la Figura 17, además en la Figura 16 se puede apreciar una caída o inclinación por parte del material refractario de 30° , esto con el fin de que una vez el aluminio se haya precalentado pueda ser depositado al resto de materia prima de una manera segura y fácil por parte del personal de operación.

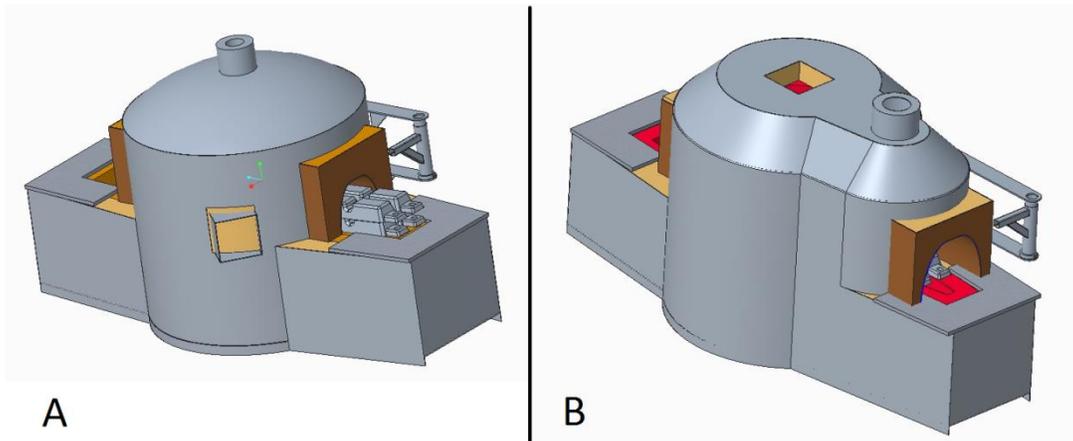


Figura 17 Rediseño horno HFN004. Lado A diseño actual, lado B propuesta de diseño.

10.3 Control de Factor de aireación

Como se muestra en el apartado 8 y 9 se posee un exceso de aire en la mezcla aire combustible por fuera de lo recomendado, ajustar este parámetro es fundamental para obtener un funcionamiento óptimo del horno. Con el fin de obtener un control de este factor se recomienda adquirir un variador de velocidad para el motor que acciona el ventilador, lo cual podrá modificar el caudal de aire que se utiliza en la combustión.

Actualmente dos hornos de la empresa poseen un control de temperatura que se ejecuta desde la plataforma *Ubidots*, esta permite observar el comportamiento dinámico del horno y almacenar el registro de los datos obtenidos. Dado lo anterior se recomienda dicha actualización al horno HFN004; el procedimiento y forma de implementación ya es conocido en la empresa.

10.4 Infraestructura de chimenea

Como se observa en la Figura 18 el horno no tiene una conexión apropiada con la chimenea, por lo cual los gases de combustión son diluidos en el ambiente ocupado por el personal de operación. Para esto se propone un cambio de la campana de extracción de los gases de combustión, con el fin de que se genere un escape adecuado de dichos gases.



Figura 18 Horno HFN004 actual

10.5 Reubicación de quemador

El quemador se encuentra actualmente en un sector lateral del horno cómo se observa en la zona A de la Figura 19, sin embargo se desea trasladar dicho dispositivo para la parte superior reflejado en la zona B de la figura antes mencionada, provocando que el frente de llama impacte directamente con la materia prima, de esta manera la fundición del aluminio se dará de manera

más rápida, disminuyendo así tiempos de producción y de espera cuando se alimenta el horno a lo largo de los diferentes turnos de operación.

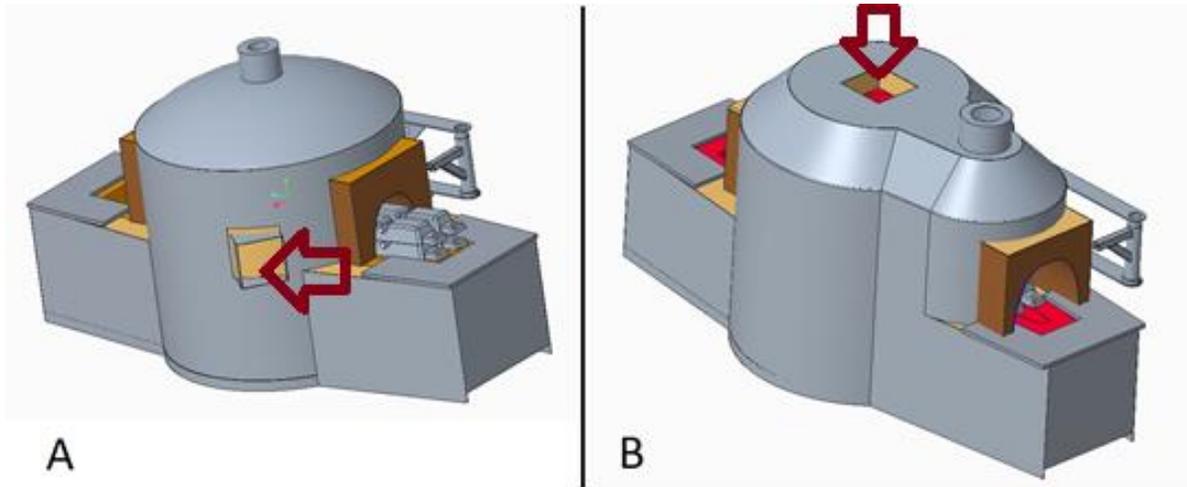


Figura 19 Posición de quemador

11 ANÁLISIS DE PROPUESTAS

En caso de implementar las propuestas mencionadas en el apartado 10 se presentan los siguientes cambios:

11.1 Aislamiento

Utilizando las ecuaciones (17 a (26 se comprueba que instalando una pared de 30 cm de manta cerámica como aislamiento, con el fin de obtener una temperatura superficial de 60°C en el exterior del horno, se observa una reducción en la perdidas en las paredes por los procesos de convección y radiación de un 80% aproximadamente.

11.2 Pre calentamiento

Cuando se alimenta el horno con materia prima se realiza aproximadamente con tres lingotes, cada uno de 10,2 kg aproximadamente, para un total de 30,6kg por carga. En el momento de ingreso al horno se genera una caída de temperatura de 100 a 120°C, lo cual provoca un paro de operación de los diferentes procesos de conformado, ya sea inyección, coquilla o arena, puesto que con estas temperaturas no se garantiza un producto optimo y además puede generar fallas en los equipos utilizados, de esta manera se presenta un tiempo muerto de entre 45 a 60 minutos.

De forma experimental se precalientan seis lingotes durante 60 min, cuya cantidad es determinada como el número máximo de elementos que pueden ser ingresados en el rediseño del horno observado en la Figura 17. La materia prima alcanza valores de 150 a 200°C, esto genera un tiempo muerto de alimentación de 15 a 30 minutos aproximadamente, provocando una caída de

temperatura de 30 a 40 °C. Observando esto se tiene una disminución de mínimo 30 minutos de tiempo muerto, así mismo una reducción en la baja de temperatura de 60°C aproximadamente, para lo cual no todos los procesos de conformado deben ser detenidos, puesto que varios productos desarrollados en Fundalco S.A.S pueden ser elaborados a partir de temperaturas de 680°. Además, se observa utilizando la ecuación (11 una reducción en la energía necesaria para fundir el aluminio de 10 a 15%, así mismo, se realiza un uso secundario a los gases de combustión, disminuyendo la temperatura de salida de estos a 340°C aproximadamente.

11.3 Factor de aireación

Realizar un control del factor de aireación permitirá disminuir el exceso de aire existente lo cual provocará una llama con mejores propiedades térmicas, esto genera un aumento en la potencia efectiva de calentamiento del quemador. Al presentarse una mejora en la calidad de la combustión, la configuración de la potencia preestablecida del quemador puede ser disminuida lo cual conlleva a una disminución del consumo de combustible de un 60% aproximadamente, esto se observa reflejado en la Tabla 12.

11.4 Comparación

El resultado de los cambios del apartado 10 son reflejados en las Tabla 12, Tabla 13, Tabla 14 y Figura 20, además utilizando la información de estas y la ecuación (27 se determina para el rediseño del horno una eficiencia de 41,4%, de esta forma se refleja un aumento del 22%

Tabla 12 Comparación de consumo de gas natural y aire

	Horno Actual		Rediseño Horno		Ahorro
GN	0,001258679	<i>kg/s</i>	0,000477074	<i>kg/s</i>	62%
	0,001576788	<i>m³/s</i>	0,000596347	<i>m³/s</i>	
Aire	0,024268897	<i>kg/s</i>	0,008516046	<i>kg/s</i>	65%
	0,031295234	<i>m³/s</i>	0,010981614	<i>m³/s</i>	

Tabla 13 Nuevo balance de masa.

POTENCIA QUEMADOR 24 kW		
Compuesto	Entrada [kg/s]	Salida [kg/s]
GN	0,000477074	-
Aire	0,008516046	-
Aluminio	0,011701613	0,011701613
Gases de escape	-	0,00899312
<i>CO₂</i>	-	0,001162069
<i>CO</i>	-	2,88346E-06
<i>O₂</i>	-	0,000373897
<i>NO</i>	-	2,15379E-08
<i>H₂O</i>	-	0,000859825
<i>SO₂</i>	-	1,52022E-07
<i>N₂</i>	-	0,006594271

Tabla 14 Nuevo Balance de energía (F-Chart Software, 2015)

Descripción		Potencia [kW]	Porcentaje		
Entrada	Combustible	24	100%		
Salida	Proceso	Fundición Aluminio	9,94	41%	
	Perdidas	Vaporización Agua	2,147	9%	
		Inquemados	0,02428	0,10%	
		Calor sensible	4,391	18%	
		Paredes	Convección	4,143	17%
			Radiación	3,486	15%

$$\eta[\%] = \frac{E_{proceso}}{\dot{m}_{fuel} PCS} 100 = 41,4\% \quad (33)$$

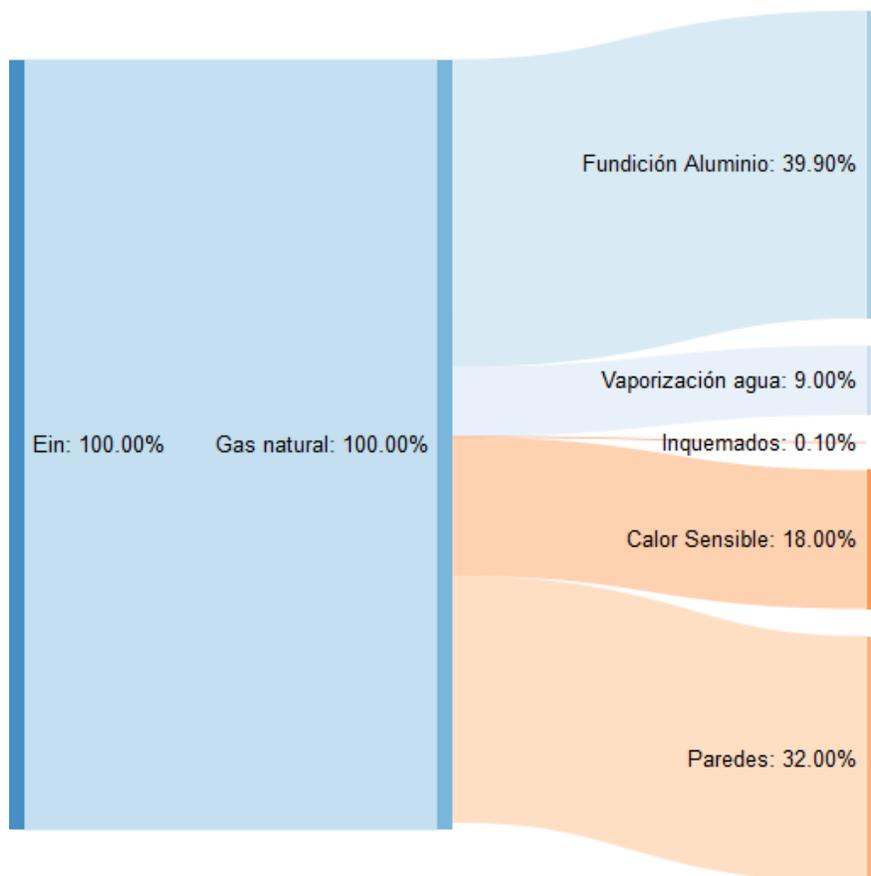


Figura 20 Diagrama Sankey de rediseño

12 PRESUPUESTO

Realizando los cambios propuestos en el apartado 10 se presentan los costos asociados en la Tabla 15, dichos valores son estimados e incluyendo el 19% de IVA. De igual forma, se observa el ahorro en la Tabla 16, para un valor de 3,864.80 \$/m³ de gas natural, tarifa de julio de 2020 para el municipio de La Estrella. El ahorro se realiza teniendo en cuenta 348 días de operación por año, durante tres turnos por día, para un total de 8352 h/año.

Tabla 15 Costos

Costos	
Variador de Velocidad	\$ 895.000
Raspberry y accesorios	\$ 13.491.000
Campana Extractora	\$ 1.646.960
Aislante y Refractario	\$ 6.902.833
Obras civiles	\$ 6.426.000
Total	\$ 29.361.793
TIR a un año	31%

Tabla 16 Ahorro

	Horno Actual		Rediseño Horno		Ahorro	
	5,676	m ³ /h	2,147	m ³ /h	3,530	m ³ /h
GN	47409,591	m ³ /año	17930,491	m ³ /año	29479,100	m ³ /año
	\$ 183.228.586	\$/año	\$ 69.297.760	\$/año	\$ 113.930.827	\$/año
						62,18%

13 CONCLUSIONES

- Se observa una pérdida de calor por paredes de un 68% y una pérdida por calor sensible de un 10%, además de un exceso de aire del 24,2%. Se recomienda un exceso de aire del 10% al 15%.
- Se determina la instalación de un variador de velocidad y un sensor de oxígeno con el fin de realizar un control óptimo del factor de aireación.
- Se establece una bahía de precalentamiento, esta disminuye riesgos de salud para el personal de operación e incrementa la eficiencia térmica del horno de fundición.
- La implementación de las mejoras propuestas posee un TIR del 31% a un año.
- La ejecución de las propuestas generará un mejoramiento en la operación y función del horno de fundición, creando un punto de partida para continuar con la intervención en los demás hornos que posee la empresa
- Es pertinente intervenir la conexión de la chimenea y los conductos dispuestos para la extracción de los gases de combustión. El calor liberado al ambiente circundante afecta la operación y la salud ocupacional del personal operativo, así mismo, la extracción de los gases de combustión ineficiente que permite la dilución de los mismo en el ambiente supone un problema de salud a largo plazo para dicho personal, por lo cual

14 REFERENCIAS

- Agencia Andaluza de la Energía. (2011). *Metodología Para La Elaboración De Auditorias Energética. I*(4), 100.
- Amell, A., & Cadavid, F. (2013). Horno de crisol autoregenerativo para procesos de alta temperatura. *Indisa.Com*, (116). Retrieved from [http://indisa.com/indisaonline/anteriores/Indisa On Line 116 - Horno de Crisol Autoregenerativo para procesos de alta temperatura.pdf](http://indisa.com/indisaonline/anteriores/Indisa%20On%20Line%20116%20-%20Horno%20de%20Crisol%20Autoregenerativo%20para%20procesos%20de%20alta%20temperatura.pdf)
- Andres, C. (2019). *Contenido Clase Diseños Térmicos 2019-I. (Ic)*.
- Auto-recuperativos, Q. (n.d.). *Quemadores autorecuperativos*.
- Calvo, C. S. (2015). Hornos utilizados en la Fabricación de Aleaciones Ferrosas y No Ferrosas. In *Scientia* (Vol. 17).
- Çengel, Y. A. B. A. M. (1965). *Termodinámica. I*, 1041.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2009). Transferencia de calor y masa Fundamentos y Aplicaciones. In *Termodinamica* (Cuarta). [https://doi.org/10: 0-8400-5444-0](https://doi.org/10:0-8400-5444-0)
- F-Chart Software. (2015). *Engineering Equation Solver*. Retrieved from <http://fchartsoftware.com/>
- HLQ INDUCTION EQUIPMENT CO.,LTD. (2015).
- INCOMBUSTION, U. T. (2017). *DIAGNÓSTICOS ENERGÉTICOS EN LOS SECTORES INDUSTRIALES COLOMBIANOS. INFORME DE VISITA. FUNDALCOS.A.S.*
- Lupi, S. (2017). Fundamentals of Electroheat. *Fundamentals of Electroheat*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46015-4>
- Nathan, A. J., & Scobell, A. (2012). Industrial Furnances. In *Foreign Affairs* (Vol. 91). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- PROMIGAS S.A. (n.d.). Retrieved from <http://www.promigas.com/Es/BEO/Paginas/ComposicionGasVigente.aspx>
- Pyronics International s.a. (2012). *Quemadores regenerativos*. 1–20.
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2008). Métodos de Fundición o Colada. *Repositorio Digital de La Facultad de Ingeniería*, 1–42. <https://doi.org/10.1163/156855301750095550>Wikipedia. (2001).