

**DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO Y ESTRUCTURACIÓN DE UNA
PROPUESTA DE AHORRO DE ENERGÍA EN EL SUBSECTOR
INDUSTRIAL DE FUNDICIONES.**

DIANA MARCELA CARABALÍ ARAUJO

Ingeniera Química



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA: ÉNFASIS EN INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI - COLOMBIA**

2017

**DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO Y ESTRUCTURACIÓN DE UNA
PROPUESTA DE AHORRO DE ENERGÍA EN EL SUBSECTOR
INDUSTRIAL DE FUNDICIONES.**

Autor

DIANA MARCELA CARABALÍ ARAUJO

Ingeniera Química

**Proyecto presentado como requisito parcial para optar al título de Magister en
Ingeniería con Énfasis en Ingeniería Química**

Directora

CARMEN ROSA FORERO AMÓRTEGUI

Ingeniera Química, Ph.D

Codirector

YONATAN CADAVID SÁNCHEZ

Ingeniero Mecánico, M Sc.

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA: ÉNFASIS EN INGENIERÍA QUÍMICA

SANTIAGO DE CALI – COLOMBIA

2017

AGRADECIMIENTOS

Primeramente doy gracias a Dios por brindarme fortaleza, paciencia, sabiduría, y perseverancia para realizar este proceso integral de formación, que deja muchísimos conocimientos, experiencias y nuevos amigos.

Gracias al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS), y la Unión Temporal INCOMBUSTIÓN por el apoyo financiero.

Agradezco a la industria del Valle del Cauca y Cauca, por aceptar su participación en este proyecto de investigación, y apoyar con los recursos técnicos necesarios para que fuese posible su realización. En especial a la industria del sector de fundición de metales ferrosos y no ferrosos, en las empresas participantes: Alumina S. A, Fundiciones Universo S. A, Gerdau Diaco S. A, Sidoc S. A, y Propulsora S. A.

Gracias a la profesora Carmen Rosa Forero Amórtegui por su apoyo, asesoría y dirección en el trabajo de investigación.

Finalmente, gracias a todos y cada una de las personas que me han apoyado y han hecho parte de mi proceso de formación en todos estos años.

RESUMEN

El incremento de la eficiencia energética es una de las opciones de mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que contribuye en el sector industrial a la disminución de los consumos de energía para la elaboración de los productos, incrementar los niveles de producción, y mejorar la competitividad de la industria a nivel nacional e internacional.

En este proyecto de grado se realizó un diagnóstico de eficiencia energética al sector industrial de fundición de metales ferrosos y no ferrosos en la región del Valle del Cauca y Cauca, el cual tiene una representación en la industria nacional del 7%; de acuerdo al nivel de activos, después de sectores industriales como: fabricación de productos de la refinación del petróleo con un 9,2%, fabricación de productos minerales no metálicos con un 8,6%, y elaboración de bebidas con un 7,9% (DANE, 2007a). El sector industrial de fundición de metales demanda cerca del 10% de la energía total consumida por la industria (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)-Consorcio Bariloche (BRP), 2007). De los cuales el 84% corresponde a energía térmica, mientras el restante equivale al consumo de energía eléctrica, con un consumo total para el año 2015 de 35.814 terajulios (Ministerio de Minas y Energía de Colombia & Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2017).

En el departamento del Valle del Cauca existen 24 establecimientos dedicados a la fundición de metales, es decir el 17,3% de la industria de fundiciones en Colombia. En el proyecto participaron cinco industrias de los departamentos del Valle del Cauca y Cauca, entre las cuales estuvieron: Alumina S. A, Fundiciones Universo S. A, Gerdaui Diaco S. A, Sidoc S. A, y Propulsora S. A. En el diagnóstico se evaluó el consumo energético térmico para cada una de estas industrias por medio de la aplicación de la norma ISO 13579-1, donde se evalúa la energía suministrada al proceso y las pérdidas de energía ocasionadas en él. Entre las pérdidas de energía cuantificadas se encuentran las pérdidas de energía por radiación y convección en las

paredes de los hornos, pérdidas de energía debido al calor sensible en los gases de combustión, pérdidas de energía por inquemados en forma de monóxido de carbono (CO), y las pérdidas de energía debido al calor latente del agua presente en el aire y los productos de combustión.

Los resultados del análisis del diagnóstico energético muestran que las pérdidas de energía por calor sensible en los gases de combustión son la principal fuente de pérdida de energía en los sistemas de fundición de aluminio, calentamiento de palanquilla de acero y tratamientos térmicos; representando un porcentaje promedio de pérdidas de energía cercano al 40%, debido a que la temperatura promedio de salida de los gases en los diferentes procesos está en aproximadamente 655°C. En segunda posición se encuentran las pérdidas de energía por causa del calor latente de vaporización del agua, representando el 13% de pérdida de energía, que corresponde a la pérdida de calor debido al agua que contiene el aire de combustión, la cual incrementa su temperatura hasta la temperatura de los gases; y la formación de vapor de agua durante la combustión del hidrógeno contenido en el combustible. Sin embargo, estas dos fuentes de pérdida de energía las contiene el flujo de gases de combustión, al igual que la energía perdida por inquemados (CO). Estas tres fuentes de pérdidas de energía, conforman el total de las pérdidas de energía en los gases de combustión, principales fuentes de pérdidas de energía en el subsector de fundición de metales ferrosos y no ferrosos, con una representación total del 54%, los cuales deben reducirse o aprovecharse a partir de las propuestas de ahorro.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente las propuestas corresponden a medidas o tecnologías disponibles que puedan ser consideradas con el propósito de reducir el consumo de energía térmica, logrando procesos más eficientes y competitivos. Entre las propuestas consideradas estuvieron: la recuperación de calor de los gases de combustión para el calentamiento del aire de combustión (RCGCA), el control de la relación aire-combustible (CRAC), la implementación de la tecnología de oxígeno enriquecido, implementación de un sistema de generación de energía eléctrica por un medio de un Ciclo Rankine Orgánico (ORC), quemadores

auto-recuperativos o auto-regenerativos (QAR), quemadores flameless (QF) y la recuperación de calor de los gases de combustión para el precalentamiento de la materia prima (RCGCM).

Entre las alternativas presentadas para construir el programa de ahorro de energía térmica, se evaluó el potencial ahorro de energía térmica, los potenciales de ahorros económicos, costos de inversión y el tiempo de retorno aproximado de la inversión. Empleando una herramienta de análisis multicriterio conocida como Analytic Hierarchy Process (AHP) o Proceso Analítico Jerárquico, en combinación con un análisis preliminar de los criterios; se concluye que las propuestas más factibles para la implementación en el subsector de fundición de metales ferrosos y no ferrosos en las regiones del Valle del Cauca y Cauca, de acuerdo al orden de factibilidad son el control de la relación aire-combustible (CRAC), la recuperación de calor de los gases de combustión para calentamiento del aire (RCGCA), la implementación de quemadores auto-recuperativos o auto-regenerativos (QAR), y la implementación de un Ciclo Rankine Orgánico para la generación de energía eléctrica (ORC).

Palabras clave: Eficiencia energética, sector industrial de fundición de metales, energía térmica, pérdidas de energía, programa de ahorro de energía.

ABSTRACT

The increase of energy efficiency is an option to reduce greenhouse gas emissions (GHG). This benefits the industrial sector by reducing the energy required to manufacture products, increasing production, and improving the competitiveness of the industry sector at a national and international level.

In this project a diagnosis of the energy efficiency of the ferrous and non-ferrous metal casting industrial sector in the Valle del Cauca and Cauca region was carried out. This sector represents 7% of Colombia's total industries; according to the level of assets, after sectors such as: product manufacture from oil refining 9.24%, non-metallic mineral product manufacturing 8.6%, and the manufacture of beverages 7.87% (DANE, 2007a). The metal casting industrial sector consumes about 10% of the total energy consumed by all industries (Mining and Energy Planning Unit (UPME) - Consortium Bariloche (BRP), 2007); of which 84% corresponds to energy of thermal origin, while the remainder corresponds to electric power, with a total consumption for the year 2000 of 39.500 terajoules.

In the Valle del Cauca Department, there are 24 establishments engaged in the casting of metals, i.e. 17,3% of Colombia's total metal casting industry. The project involved five metal casting businesses from the department of Valle del Cauca and Cauca, among which were: Alumina S.A, Fundiciones Universo S.A, Gerdau Diaco S.A, Sidoc S.A, and Propulsora S. A. The diagnosis evaluated the thermal energy consumption of each of these businesses, along with the respective loss of energy in the metal casting process. Some of the causes of energy loss found were: energy losses through radiation and convection in the walls of the furnaces, loss of energy due to sensible heat in the fuel gases, loss of energy due to unburned fuels in the form of carbon monoxide (CO), and the loss of energy due to the latent heat from water present in the air and the combustion products.

The results from the energy diagnosis analysis show that energy losses due to sensible heat in the fuel gases are the main source of energy loss in the aluminium casting systems, in the heating of billets and the heat treatments; representing an average energy loss of 39,98%, since the average temperature of the flue gas output in different industrial processes is 654,81°C. In second position is the energy loss due to the latent heat from the vaporization of water. This corresponds to the loss of heat through the water contained in the combustion air, which increases its temperature until it reaches the temperature of the gases; and the formation of water vapour during the combustion of hydrogen contained in the fuel. However, these two sources of energy loss are contained in the fuel gas stream, as well as the energy loss due to unburned fuel (CO). These three sources of energy loss, encompass the total losses of energy in the fuel gases. These represent the main sources of energy loss in the ferrous and non-ferrous metal casting subsector with a total representation of 54,22%, which should be reduced or used more efficiently through the implementarion of energy savings proposals.

Considering the points previously mentioned, the proposals correspond to available measures or technologies that could be considered in order to reduce the consumption of thermal energy, making the industrial processes more efficient and competitive. Among the proposals considered were: recovering heat from flue gases to heat the combustion air (RCGCA), controlling the air-fuel ratio (CRAC), the implementation of oxygen enriched technology (EACOX), Implementation of an electric power generation system by means of an Organic Rankine Cycle (ORC), self-regenerating or self-recuperating burners (QAR), flameless burners (QF), and the recovery of heat in the combustion gases to preheat raw materials (RCGCM).

Different the alternatives presented were assed using different factors to create the thermal energy savings program: the potential thermal energy savings, the potential economic savings, the costs of investment and the approximate time for the return of the investment. Using a multicriteria analysis tool known as the Analytic Hierarchy Process (AHP), combined with a preliminary analysis of the criteria; It was concluded

that the most feasible proposals for implementation in the ferrous and non-ferrous metal casting subsector in the Valle del Cauca and Cauca regions are the controlling the excess, the recovering heat from flue gases to heat the combustion air (RCGCA), implementation of self-regenerating or self-recuperating burners, of air and+ the implementation of an Organic Rankine Cycle to generate electric power.

Key Words: Energy efficiency, metal casting industrial sector, thermal energy, loss of energy, energy savings program.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	19
2. OBJETIVOS.....	22
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	22
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3. ANTECEDENTES.....	23
4. MARCO CONCEPTUAL.....	29
4.1. FUNDICIÓN DE METALES NO FERROSOS	29
4.1. FUNDICIÓN DE METALES FERROSOS	33
4.2.1. Calentamiento de palanquilla	34
4.2.2. Tratamientos térmicos	35
4.2.2.1. Procesos térmicos	36
4.2.2.2. Procesos termoquímicos.....	38
4.3. NORMATIVA PARA EL DESARROLLO DEL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO	39
4.3.1. Norma internacional estándar ISO 13579: metodología del balance de energía-cálculo de eficiencia	39
5. METODOLOGÍA.....	46
5.1. Identificación de las empresas.....	46
5.2. Metodología de mediciones para la realización del diagnóstico energético.	47
5.3. Reconocimiento de la tecnología utilizada	48
5.4. Balances de materia y energía	48
5.5. Indicadores de consumo de energía térmica	48

6. DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO AL SUBSECTOR INDUSTRIAL DE FUNDICIONES.....	50
6.1. IDENTIFICACIÓN DE LAS EMPRESAS	50
6.2. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA UTILIZADA.....	52
6.2.1. Descripción de la tecnología utilizada en la fundición de metales no ferrosos	53
6.2.2. Descripción de la tecnología utilizada en el calentamiento de palanquilla	55
6.2.3. Descripción de la tecnología utilizada en los tratamientos térmicos	58
6.3. ANÁLISIS DE MEDICIONES, BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA.	59
6.3.1. Fundición de metales no ferrosos.....	59
6.3.1.1. Gases de combustión	60
6.3.1.2. Exceso de aire.....	61
6.3.1.3. Balance de materia y energía	62
6.3.2. Calentamiento de palanquilla.....	68
6.3.2.1. Gases de combustión	68
6.3.2.2. Exceso de aire.....	70
6.3.2.3. Balance de masa y energía	71
6.3.3. Tratamientos térmicos.	75
6.3.3.1. Gases de combustión	75
6.3.3.2. Exceso de aire.....	76
6.3.3.3. Balance de masa y energía	77
6.4. INDICADORES DEL CONSUMO DE ENERGÍA TÉRMICA.....	80
6.4.1. Fundición de metales no ferrosos.....	80
6.4.2. Calentamiento de palanquilla.....	82
6.4.3. Tratamientos térmicos	83
7. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPUESTAS DE MEJORA DE LA ENERGÍA TÉRMICA PARA EL SECTOR DE FUNDICIONES	85

7.1. RECUPERACIÓN DE CALOR DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN PARA EL CALENTAMIENTO DEL AIRE DE LA COMBUSTIÓN. (RCGCA).....	87
7.2. CONTROL DE LA RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE (CRAC).....	89
7.3. ENRIQUECIMIENTO DEL AIRE DE COMBUSTIÓN CON OXÍGENO (EACOX).....	90
7.4. IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR UN CICLO RANKINE ORGÁNICO (ORC)	91
7.5. QUEMADORES AUTO-RECUPERATIVOS O AUTO-REGENERATIVOS (QAR)	92
7.6. QUEMADORES FLAMELESS (QF)	94
7.7. RECUPERACIÓN DE CALOR EN LOS GASES DE COMBUSTIÓN PARA EL PRECALENTAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA (RCGCM)	95
8. EVALUACIÓN DE LAS PROPUESTAS DE MEJORA DE LA ENERGÍA TÉRMICA PARA EL SECTOR DE FUNDICIONES.....	97
8.1. RECUPERACIÓN DE CALOR DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN PARA EL CALENTAMIENTO DEL AIRE DE LA COMBUSTIÓN (RCGCA).....	97
8.2. CONTROL DE LA RELACIÓN AIRE- COMBUSTIBLE (CRAC)..	101
8.3. ENRIQUECIMIENTO DEL AIRE DE COMBUSTIÓN CON OXÍGENO (EACOX).....	104
8.4. IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR UN CICLO RANKINE ORGÁNICO (ORC)	106
8.5. QUEMADORES AUTO-RECUPERATIVOS O AUTO-REGENERATIVOS (QAR)	110
8.6. QUEMADORES FLAMELESS (QF)	112

8.7. RECUPERACIÓN DE CALOR EN LOS GASES DE COMBUSTIÓN PARA EL PRECALENTAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA (RCGCM)	114
9. PROGRAMA DE MEJORA DE LA ENERGÍA TÉRMICA PARA EL SECTOR DE FUNDICIONES.....	117
9.1. RANKING DE LAS ALTERNATIVAS DEL PROGRAMA DE MEJORA DE LA ENERGÍA TÉRMICA PARA EL SECTOR DE FUNDICIONES	124
9.2. ESTRATEGIA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS PARA LA MEJORA DE LA ENERGÍA TÉRMICA AL SECTOR DE FUNDICIONES.....	127
CONCLUSIONES.....	131
RECOMENDACIONES.....	135
BIBLIOGRAFÍA.....	137

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Distribución del sector industrial de fundición de metales en Colombia, en función del número de establecimientos, producción bruta y total de activos (DANE, 2007b).	26
Figura 2. Proceso de fundición de aluminio	31
Figura 3. Procesos realizados a los metales ferrosos (hierro y acero)	34
Figura 4. Consumo específico térmico en hornos de fundición de aluminio a partir de chatarra nueva en Alúmina S.A.....	63
Figura 5. Consumo específico térmico en hornos de fundición de aluminio a partir de chatarra vieja en Propulsora S.A.	64
Figura 6. Diagrama Sankey del horno 610 –Alúmina S. A	67
Figura 7. Diagrama Sankey del horno 1070 –Alúmina S.A	67
Figura 8. Diagrama Sankey del horno 612–Alúmina S. A	67
Figura 9. Diagrama Sankey del horno 6–Propulsora S.A.....	67
Figura 10. Volumen de control para el balance de materia y energía en hornos de calentamiento de palanquilla.....	68
Figura 11. Consumo específico térmico para el calentamiento de palanquilla.....	72
Figura 12. Diagrama Sankey del horno #2 -Sidoc S. A (sin tener en cuenta la recuperación de calor).....	74
Figura 13. Diagrama Sankey del horno Bendotti –Gerdau Diaco S. A (sin tener en cuenta la recuperación de calor).....	74
Figura 14. Consumo específico térmico en un horno de recocido.....	77
Figura 15. Diagrama Sankey del horno #1 en un tratamiento térmico de recocido en Fundiciones Universo S. A	79
Figura 16. Intensidad térmica en la fundición de metales no ferrosos- Aluminio durante el año 2015.	81
Figura 17. Eficiencia del proceso de fundición de metales no ferrosos- Aluminio durante el año 2015.	81
Figura 18. Intensidad térmica en el calentamiento de Palanquilla durante el año 2015	82
Figura 19. Eficiencia del proceso de fundición de metales ferrosos-Calentamiento de Palanquilla durante el año 2015.	83
Figura 20. Intensidad térmica en el tratamiento térmico de metales ferrosos durante el año 2015.	84
Figura 21. Ahorro de combustible en función de la temperatura del aire precalentado. Fuente: (Shires, 2006).....	88

Figura 22. Esquema de un recuperador de calor para el calentamiento del aire de combustión. Fuente: (U.S. Department of Energy -Energy Efficiency and Renewable Energy & ITP Metal Casting, 2005)	89
Figura 23. Esquema uso de ciclo ORC después del intercambiador de calor(Nimbalkar & Oak Ridge National Laboratory, 2015).	92
Figura 24. Quemadores auto-regenerativos	94
Figura 25. Horno crisol con quemadores auto-regenerativos (Amell et al., 2013).	145
Figura 26. Horno reverbero para la fundición de aluminio (Emison, 2000).....	147
Figura 27. Horno Stack (Schifo & Radia, 2004)	148
Figura 28. Horno rotatorio (Boeckenhauer & Kaczmarczyk, 2013).....	150
Figura 29. Hornos de empuje para calentamiento de palanquilla:	152
Figura 30. Hornos de de vigas caminantes para calentamiento de palanquilla:	153
Figura 31. Horno de cámara con puerta tipo guillotina.	155
Figura 32. Secciones longitudinal y frontal de un horno de solera móvil.	156
Figura 33. Horno de recirculación tipo carro con puerta frontal de guillotina.	157

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Empresas participantes en el subsector de fundiciones en el Valle del Cauca y Cauca.....	51
Tabla 2. Características de los hornos de fundición de aluminio en Alumina y Propulsora S.A.	54
Tabla 3. Características de los hornos de calentamiento de palanquilla en Sidoc S. A y Gerdau Diaco S. A	57
Tabla 4. Características del horno 1 de tratamientos térmicos en Fundiciones Universo S.A.	59
Tabla 5. Composición y temperatura de los gases de combustión en los hornos de Propulsora S. A y Alúmina S. A	60
Tabla 6. Relación aire-combustible molar en los hornos de Alúmina S. A y Propulsora S.A.	62
Tabla 7. Balance de energía de los hornos de fundición de Aluminio.....	66
Tabla 8. Composición y temperatura de los gases de combustión en los hornos de Sidoc S. A y Gerdau Diaco S. A	69
Tabla 9. Relación aire-combustible molar en los hornos de Sidoc S. A y Gerdau Diaco S. A –planta Yumbo.	70
Tabla 10. Balance de energía de los hornos de calentamiento de palanquilla.	73
Tabla 11. Composición y temperatura de los gases de combustión en el tratamiento térmico de revenido en Fundiciones Universo S.A.....	75
Tabla 12. Relación aire-combustible molar en el tratamiento térmico en Fundiciones Universo S.A.	76
Tabla 13. Balance de energía durante el proceso de revenido en el horno 1 de Fundiciones Universo S.A.	78
Tabla 14. Pérdidas de energía en el subsector de fundiciones de metales ferrosos y no ferrosos.....	86
Tabla 15. Potenciales de ahorro de energía térmica con el calentamiento del aire de combustión.	100
Tabla 16. Potenciales de ahorro de energía térmica con el control de la relación aire combustible con el exceso de aire en 17,5%.....	103
Tabla 17. Potenciales de ahorro de energía térmica con la implementación de oxicomustión.....	105
Tabla 18. Potenciales de ahorro de energía térmica usando un Ciclo Rankin Orgánico para generar energía eléctrica.....	108
Tabla 19. Potenciales de ahorro de energía térmica con la implementación de quemadores auto –regenerativos.	111

Tabla 20. Potenciales de ahorro de energía térmica con la implementación de quemadores flameless.	113
Tabla 21. Potenciales de ahorro de energía térmica al implementar calentamiento de la carga en la fundición de aluminio.	116
Tabla 22. Cuadro comparativo de los potenciales de ahorro económico para cada una de las propuestas en las empresas intervenidas en el Valle del Cauca y Cauca.....	119
Tabla 23. Costos de inversión de las propuestas de ahorro de energía térmica en las empresas del sector de fundición de metales ferrosos y no ferrosos en el Valle del Cauca y Cauca.....	121
Tabla 24. Tiempo de retorno de la inversión de las propuestas de ahorro de energía térmica en el sector de fundición de metales ferrosos y no ferrosos en el Valle del Cauca y Cauca.....	122
Tabla 25. Matriz de alternativas evaluada en los criterios de priorización	125
Tabla 26. Balance de masa del horno de fundición de aluminio H610 en Alumina S. A.....	158
Tabla 27. Balance de masa del horno de fundición de aluminio H612 en Alumina S. A.....	158
Tabla 28. Balance de masa del horno de fundición de aluminio H1070 en Alumina S. A.....	159
Tabla 29. Balance de masa del horno de fundición de aluminio H6 en Propulsora S. A.....	159
Tabla 30. Balance de masa del horno de calentamiento de palanquilla Horno 2 de Sidoc S. A	160
Tabla 31. Balance de masa del horno de calentamiento de palanquilla Horno Bendotti en Gerdau Diaco S. A.....	160
Tabla 32. Balance de masa del horno de tratamiento térmico horno #1 en Fundiciones Universo S. A	161

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1 “Hornos de Combustión para la Fundición de Metales No Ferrosos”	143
Anexo 2 “Hornos de Calentamiento de Palanquilla”	151
Anexo 3. “Hornos para Tratamientos Térmicos”	154
Anexo 4. “Balances de masa en la fundición de aluminio en Alumina S. A y Propulsora S. A”	158
Anexo 5. “Balances de masa en el calentamiento de palanquilla en Gerdau Diaco S. A y Sidoc S. A”	160
Anexo 6. “Balances de masa en el tratamiento térmico de revenido en el horno 1 de Fundiciones Universo S. A”	161
Anexo 7. “Costos de los quemadores auto-regenerativos o auto-recuperativos”	162

1. INTRODUCCIÓN

El aumento progresivo de la temperatura promedio del planeta, el creciente número y severidad de los fenómenos meteorológicos extremos y el cambio de los patrones de precipitación causado por las emisiones continuas de gases de efecto invernadero, presenta desafíos cada vez mayores que afectarán la producción y el suministro de energía, tanto térmica como hidroeléctrica.

Existen diferentes opciones maduras que deben ser implementadas, y tendrán como resultado una mitigación sustancial de las emisiones de GEI. Entre las opciones de mitigación se tienen: disminuir las emisiones producidas por la extracción y conversión de combustibles fósiles, cambio a combustibles bajos en carbono, incrementar el uso de tecnologías de energía renovable, la captura y almacenamiento de carbono (CCS), reducir la demanda energética y mejorar la eficiencia energética. En este contexto, y debido a que el sector industrial ha tenido una participación en el producto interno bruto, entre 1994 y 2014, entre 14% a 11%, y el consumo energético durante el 2013 fue del 23,7% a nivel nacional (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2015), cifra superior a su participación en el PIB, la implementación de una de estas opciones de mitigación de las emisiones de GEI en el sector industrial es una herramienta clave en el país para contribuir con la disminución del impacto ambiental; y a su vez lograr incrementar la eficiencia energética de la industria, disminuyendo los consumos de energía para la elaboración de los productos, incrementar los niveles de producción y mejorar la competitividad de la industria a nivel nacional e internacional.

El Gobierno Nacional a través de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) viene desarrollando la estrategia de uso racional y eficiente de energía (URE), con el propósito de adecuar la estructura productiva del sector energético del país a la disponibilidad de los recursos. Mediante la incorporación de políticas de ahorro y conservación de los recursos naturales, programas de promoción y adecuada

utilización de la energía en los procesos productivos, la incorporación de mejores hábitos, la adopción de tecnologías más eficientes y el uso de energéticos escasos por otros más abundantes desde el punto de vista económico, y/o energéticos más “ineficientes” por otros más eficientes desde la óptica energética. A pesar de haberse establecido estas políticas sobre eficiencia energética, la intensidad energética es desfavorable para la industria ya que la mayoría de los subsectores industriales experimentan tendencias crecientes de este indicador (Unidad de Planeación Minero Energética, 2001).

El sector industrial de fundición de metales en Colombia tiene una representación en la industria nacional del 7,0%; de acuerdo al nivel de activos, después de sectores industriales como: fabricación de productos de la refinación del petróleo con un 9,2%, fabricación de productos minerales no metálicos n.c.p (no clasificados previamente; entre los minerales incluidos en la clasificación de actividades económicas, CIIU, están los productos refractarios, arcilla para la construcción, productos de cerámica y porcelana, cemento, cal, yeso, artículos de hormigón, y piedra) con un 8,6%, y elaboración de bebidas con un 7,9% (DANE, 2007a). El sector industrial de fundición de metales, demanda cerca del 10% de la energía total consumida por la industria (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)- Consorcio Bariloche (BRP), 2007).

El consumo de energía del sector de fundición de metales ferrosos y no ferrosos durante el año 2000, correspondió a un 84% en energía de origen térmico, mientras el restante equivale al consumo de energía eléctrica, con un consumo total para ese año de 39.500 terajulios. En una comparación en otros entornos geográficos de empresas internacionales con procesos similares para los mismos productos; donde se observó que el consumo específico para las empresas nacionales es de 7,00 GJ/t, superior al reportado internacionalmente de 5,84 GJ/t, representado un potencial de aprovechamiento asociado a cambios de tecnologías ineficientes, baja utilización de la capacidad productiva y cambios estructurales que ha sufrido el sector (Unidad de Planeación Minero Energética, 2001). Por tal motivo, en este proyecto se realizó un

diagnóstico energético térmico al subsector de fundición de metales; con el fin de identificar su estado actual en cuanto eficiencia energética, productividad, emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero y promover propuestas de ahorro de energía térmica en dicho sector. El proyecto tiene el apoyo técnico, financiero y académico de COLCIENCIAS a través de la Unión Temporal INCOMBUSTIÓN, en la cual participa la Universidad del Valle a través del grupo de Ciencia y Tecnología del Carbón (GCTC).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Diagnosticar y estructurar un programa de mejora energética en los sistemas de combustión y calentamiento del subsector de fundición de metales ferrosos y no ferrosos, en Valle del Cauca y Cauca.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Diagnosticar los sistemas de combustión y calentamiento del subsector de fundiciones de metales ferrosos y no ferrosos, para identificar su estado actual en cuanto a perfil energético, eficiencia energética térmica y productividad.
- ✓ Identificar las propuestas de ahorro de consumo energético térmico en el subsector de fundiciones de metales ferrosos y no ferrosos, a partir de la valoración de los procesos productivos.
- ✓ Evaluar las propuestas de ahorro de consumo energético en el subsector de fundiciones de metales ferrosos y no ferrosos, en base a los costos de la energía ahorrada y potenciales costos de inversión.
- ✓ Construir un programa de mejora de la energía térmica para el sector de fundiciones a partir de la valoración de los procesos productivos, y la identificación de las principales causas de pérdida energética.

3. ANTECEDENTES

A consecuencia de la crisis de los energéticos en la década de los setenta, por la escasez de petróleo en 1973, y el cambio climático a lo largo de la historia, que ha ocasionado graves e irreversibles impactos alrededor del mundo, surgió el compromiso internacional de mantener el incremento de la temperatura de la tierra por debajo de los 2°C, en relación a los niveles preindustriales; y para ello se requiere la reducción sustancial y sostenida de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Por las razones anteriormente mencionadas se inició el debate sobre el uso adecuado de los recursos energéticos. En respuesta a esto los países formularon políticas severas de sustitución de energéticos, así como la conformación de programas para la optimización del uso de la energía. Sin embargo, en la implementación de estas políticas y programas a nivel industrial se han presentado algunas barreras económicas entre las cuales se mencionó la distorsión de los precios de los combustibles, la incertidumbre sobre los precios del combustible; barreras estructurales como políticas de regulación, códigos y normas. Y por último las barreras comportamentales entre ellas: la actitud de quienes toman decisiones, agentes respecto a la eficiencia energética, el riesgo percibido en las inversiones de eficiencia energética, las lagunas de información, la falta de personal capacitado y los incentivos equivocados para implementar tecnologías y prácticas de eficiencia energética (Trianni, Cagno, Thollander, & Backlund, 2013).

Un factor determinante que influye sobre la superación de las barreras de eficiencia energética, es la auditoria energética en relación a los requerimientos que propone la norma ISO 50001(Laire, 2013). La aplicación de esta norma brinda una mayor percepción o claridad de las barreras y permite que la organización defina una estructura probada para lograr la mejora continua de sus procedimientos y procesos con la implementación de un sistema de gestión integral de la energía (SGE); el cual señala las ineficiencias y oportunidades de reducir el consumo de energía, además que se genera conciencia en las empresas respecto a las dificultades efectivas de realizar inversiones en tecnologías de eficiencia energética. Luego, en la auditoría

energética se expresa claramente lo que debe hacer la empresa y los responsables políticos (Trianni et al., 2013).

La auditoría energética se desarrolla siguiendo tres fases o pasos, dentro de los cuales están: diagnóstico de la situación actual, donde se realiza un análisis de la situación actual de la empresa que se desea auditar, se caracteriza el tipo de empresa, su situación y entorno, los suministros energéticos y los sistemas consumidores de energía. Continúa la fase de desarrollo, donde se enmarca la realización de un diagnóstico energético, donde se toman mediciones de los principales parámetros y se analizan los datos. Y en la fase final se incluye la redacción de un informe técnico y económico de auditoria con la situación prevista, y aportando las mejoras necesarias.

En el año 2013, la Unión Temporal Incombustión en convenio con la Unidad de Planeación Minero Energética y COLCIENCIAS, desarrollaron un proyecto de diagnósticos de eficiencia energética en los sectores industriales Colombianos, con clasificación industrial Uniforme, CIIU, del 10 al 18, correspondiente a los sectores industriales de alimentos, bebidas, tabaco, textil, confecciones, cuero, papel e impresiones; con el fin de determinar posibilidades de disminución del consumo final de energía. Resultado de esta investigación se encontró que los principales combustibles empleados a nivel industrial son el gas natural (27%), carbón (28%) y el bagazo de caña (13%); siendo el gas natural un combustible común a todos los sectores, mientras el carbón y el bagazo se utilizan principalmente para la cogeneración en los sectores de alimentos, textil y papel. Se concluyó también que los sectores industriales de textil, papel y alimentos tienen una alta intensidad energética térmica, con una línea base de eficiencia de combustión del 74%. Se construyeron cuatro programas de penetración de la tecnología de alta eficiencia energética para abordar los potenciales de ahorro de estos sectores industriales, entre ellos se mencionó incorporación de quemadores modernos con control de la relación aire/combustible, sustitución de calderas obsoletas por la tecnología de calderas de lecho fluidizado, calentamiento descentralizado utilizando combustibles gaseosos y la

adopción de motores de un mínimo de eficiencia obligatoria (INCOMBUSTIÓN-Red de Investigación e Innovación en Combustión Avanzada de Uso Industrial, 2014).

Finalizado el estudio de la Unión Temporal Incombustión a los sectores industriales con código CIIU del 10 al 18, continua la Unión Temporal en un nuevo convenio en COLCIENCIAS; donde se realizó un diagnóstico de eficiencia energética a los sectores industriales Colombianos con alta intensidad energética térmica, códigos CIIU 19, 20, 23 y 24; correspondiente a la fabricación de sustancias y productos químicos, fabricación de otros productos minerales no metálicos (fabricación de cerámicos, cemento, ladrillo, cal) y fabricación de productos metalúrgicos básicos, respectivamente. En este nuevo proyecto la Universidad del Valle logró la participación de diez industrias de la región, de las cuales la mitad corresponde al sector de fundición de metales ferrosos y no ferrosos.

El subsector industrial de fundición de metales en Colombia corresponde a la clasificación industrial uniforme, código CIIU 243, subdividido en 2431 fundición de metales ferrosos, entre ellos hierro y acero, y 2432 fundición de metales no ferrosos, por ejemplo aluminio, cobre, níquel, zinc, titanio y aleaciones como el latón (DIAN, 2012). El sector industrial de fundición de metales en Colombia ha demostrado tener una gran importancia en la industria nacional, pues representa el 10,1% del total de la producción industrial (ANDI-Cámara de Fedemetal & DANE, 2009). En el 2007, en Colombia existían 7.262 establecimientos, de los cuales 139 pertenecían al subsector industrial de fundición de metales, distribuidos así: 100 establecimientos de fundición de metales ferrosos, hierro y acero, y 39 establecimientos de fundiciones de metales no ferrosos. En la región del Valle del Cauca existen 24 establecimientos dedicados a la fundición de metales, es decir el 17,3% de la industria de fundiciones en Colombia. Las otras regiones del país donde se encuentra mayor ubicación de este sector industrial corresponden al centro de país en Bogotá, con un total de 47 establecimientos en fundición de metales, es decir el 33,81 % de la industria nacional; con un nivel de producción del 11,79%, menor al departamento del Valle, el cual se encuentra en 15,22%; por lo que se concluye que muchos de dichos establecimientos

corresponden a pequeñas y micro empresas. En el departamento de Antioquía existen 26 establecimientos para la fundición de metales, es decir el 18,71% de la industria nacional, segundo después del distrito capital; con un nivel de producción del 16,76%, ver Figura 1 (DANE, 2007b).

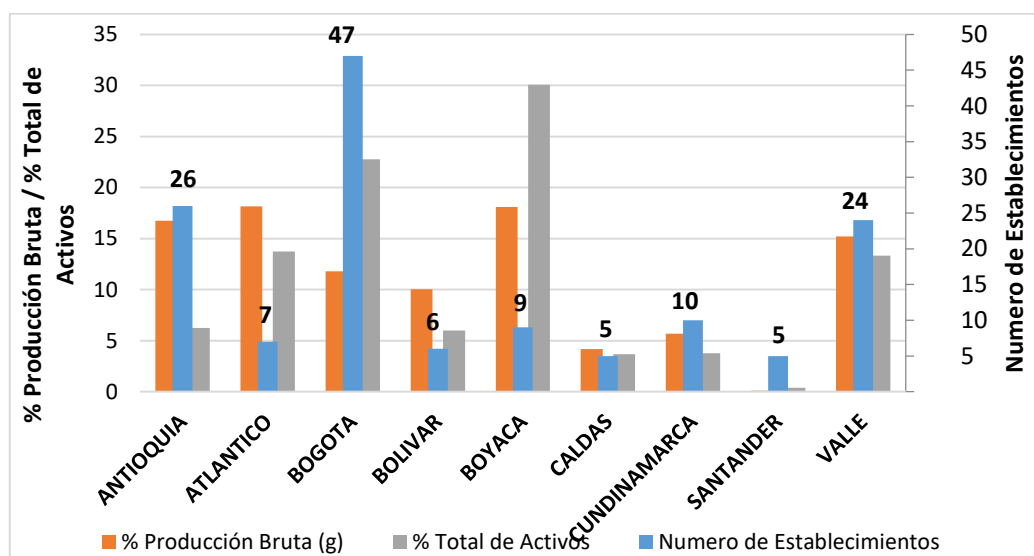


Figura 1. Distribución del sector industrial de fundición de metales en Colombia, en función del número de establecimientos, producción bruta y total de activos (DANE, 2007b).

Se resalta que el sector industrial de fundiciones en Colombia trabaja básicamente hierro, acero, aluminio y cobre; y se clasifica a las industrias en integrada, semi-integrada, y sin integrar. Se denominan industrias integradas a la planta industrial dedicada al proceso de producción del metal a partir del mineral. Las industrias semi-integradas corresponden a aquellas que inician el proceso con metal usado (chatarra) o el tratamiento de material importado. Y las industrias sin integrar, son aquellas dedicadas a la transformación del metal.

En el año 2001, la Unidad de Planeación Minero Energética desarrolló un estudio de determinación de la eficiencia energética del subsector industrial de fundición de metales ferrosos (hierro y acero), y metales no ferrosos; en este estudio se determinó que la intensidad energética de empresas de fundición de hierro y acero a nivel

nacional se encontraba en 7,0 GJ/ tonelada (Unidad de Planeación Minero Energética, 2001), mientras en estudios similares desarrollados por el Departamento de Energía de los Estados Unidos se reporta un consumo específico de 5,84 GJ/ tonelada en hornos de arco eléctrico (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2012); expresando un claro potencial de ahorro de consumo. En otros procesos realizados a los metales ferrosos, como es el calentamiento de palanquilla para la elaboración de barras de acero lisos y corrugados, se reportó a nivel nacional un consumo específico de 6,49 GJ/ tonelada (Unidad de Planeación Minero Energética, 2001), mientras a nivel internacional los hornos viejos reportaban consumos específicos de 1,9 GJ/ tonelada, y con la implementación de hornos recuperadores de calor, quemadores de bajo NOx, y sistemas de control para administrar la velocidad de combustión se han alcanzado consumos específicos de 1,16 GJ/ tonelada (U.S. Department of Energy Office of Industrial Technologies, 2000). Mientras en el año 2008 el mejor indicador del consumo específico térmico para la industria del acero, en el proceso de calentamiento de palanquilla fue de 1,3 GJ/t (Worrell, Price, Neelis, Galitsky, & Nan, 2008)

Por su parte, en las empresas de fundición de metales no ferrosos como el aluminio, las cuales inician su proceso a partir del tratamiento de aluminio importado y/o recuperación del metal usado (chatarra), es decir son industrias semi-integradas, la intensidad energética de estas empresas está en 17,3 GJ/tonelada; y para esta época el mejor indicador del consumo específico de energía térmica para la fundición de aluminio es de 5,92 GJ/ tonelada (Unidad de Planeación Minero Energética, 2001). Actualmente, a nivel internacional se conocen indicadores de consumo específico para procesos similares, los cuales emplean la chatarra vieja como materia prima de 3,8 GJ/tonelada (Moya et al., 2015). La chatarra empleada como materia prima se clasifica como chatarra nueva, el material recolectado después de la fabricación de productos de aluminio distribuidos al consumidor final (material no conforme); y la chatarra vieja que corresponde al material recuperado después del uso del producto. En este contexto, el mejor indicador de consumo específico de energía térmica para la fundición de aluminio a partir de chatarra nueva es de 2,5 GJ/tonelada, empleando

hornos reverberos con quemadores regenerativos y sistemas de control (Worrell et al., 2008).

El indicador económico que relaciona el rendimiento, variación de la eficiencia energética y el personal utilizado para la producción, se conoce como índice de productividad; en el caso del sector industrial de fundición de metales ferrosos (hierro y acero) entre el año 1.998 al 2.000 ha aumentado de 166,8 a 204,4 toneladas – hombre/ año (t-h/año), mostrándose un incremento en la gestión empresarial, aunque es inferior al índice de américa latina calculado por la ILAFA (Instituto Latinoamericano de hierro y acero) en 391 t-h/año para 1998 (Unidad de Planeación Minero Energética, 2001).

Los resultados de la caracterización del sector industrial de fundición de metales en Colombia ponen en manifiesto la clara desventaja de nuestro país en términos de eficiencia energética al compararnos con el entorno internacional. Por ello, los proyectos de uso racional de la energía URE, se han desarrollado con el objetivo de reducir el consumo de energía, sin sacrificio de la utilidad obtenida de la energía disponible, y la reducción de costos de producción de bienes o servicios. Además, de la conservación de los recursos, aprovechamiento de las tecnologías eficientes, reposición de equipos y la sustitución energética. En el estudio realizado, en las grandes y medianas industrias de fundición de hierro y acero en Colombia durante el 2001, el potencial de ahorro de energía es de 3.27 millones de barriles equivalentes de petróleo al año, que corresponde a 28 millones de dólares en el 2001 (Unidad de Planeación Minero Energética, 2001). Para alcanzar estos potenciales de ahorro es necesario caracterizar la tecnología empleada, identificar los ajustes operacionales, e inversiones que permitan capitalizar la innovación tecnológica, y de acuerdo con la situación de la industria resulten efectivas desde el punto de vista de los costos.

4. MARCO CONCEPTUAL

El sector industrial de fundiciones de metales ferrosos y no ferrosos, se encarga de la producción, transformación o recuperación del hierro, acero, aluminio, cobre, plomo, zinc, estaño y níquel. En el proceso de producción se realiza el calentamiento de los materiales hasta la temperatura de fusión correspondiente y se adicionan algún tipo de aleantes para modificar las propiedades mecánicas del material. En los procesos de transformación se realiza el recalentamiento del material para reducir la sección a la vez que se logra aumentar su longitud; en otros procesos de transformación se realiza el recalentamiento de los materiales en condiciones específicas para conseguir cambios en la estructura cristalina. A continuación se muestra una breve descripción de los procesos del sector de fundiciones de metales ferrosos y no ferrosos identificados en el proyecto.

4.1. FUNDICIÓN DE METALES NO FERROSOS

Entre los diversos metales no ferrosos que se trabajan en la industria de fundiciones, se conocen el aluminio, cobre, níquel, zinc, titanio y aleaciones como el latón. Sin embargo, en las empresas de fundición intervenidas en la región del Valle del Cauca el metal no ferroso fabricado principalmente es el aluminio.

El aluminio puede producirse a partir de recursos naturales, es decir bauxita, o a partir de material reciclado (chatarra). Estos procesos se conocen con el nombre de aluminio primario, y aluminio secundario, respectivamente (Luo & Soria, 2008). La recuperación del aluminio de la chatarra para la producción de lingotes de aluminio secundario consume aproximadamente el 6% de la energía requerida para producir aluminio primario (U.S. Department of Energy, 2007). Las industrias de aluminio existentes en el país, inician los procesos a partir del tratamiento del aluminio

importado y/o la recuperación de chatarra, es decir son industrias de aluminio secundario (Unidad de Planeación Minero Energética, 2001).

El proceso de fundición para la obtención de aluminio en estado líquido requiere de tres componentes energéticos los cuales se describen como:

- La energía requerida para elevar el metal hasta su temperatura de fusión (calor sensible)
- El calor latente requerido para convertir el metal desde el estado sólido a líquido
- Energía requerida para llevar el metal fundido hasta la temperatura requerida para el vaciado de la colada.

Matemáticamente estos tres aportes energéticos pueden ser expresados como se observa en la ecuación 1 (Universidad Nacional Autónoma de México, 2008):

$$H = \rho V [C_s(T_m - T_0) + H_f + C_l(T_p - T_m)] \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

H= Calor requerido para elevar la temperatura del metal a la temperatura de vaciado de la colada. [J]

ρ = Densidad del metal [Kg/m³]

V= Volumen del metal que se calienta [m³]

C_s = Calor específico del metal sólido [J/kg °C]

T_m = Temperatura de fusión del metal [°C]

T_0 = Temperatura inicial, generalmente la ambiente [°C]

H_f = Calor de Fusión [J/kg]

C_l = Calor específico del metal líquido [J/kg °C]

T_p = Temperatura de vaciado [°C]

La temperatura de los hornos de fundición varía dependiendo del tipo de horno, aleación y otros factores propios. En realidad, las temperaturas normales de vertido

de aluminio están en el rango de 650°C a 750°C (U.S. Department of Energy, 2007). La energía necesaria se suministra de combustibles sólidos, gas natural, electricidad u otras fuentes de energía. Los hornos de fusión varían en diseño, geometría, capacidad de producción, materiales de construcción y modos de operación. En la Figura 2 se muestra un diagrama básico del proceso de fundición de aluminio.

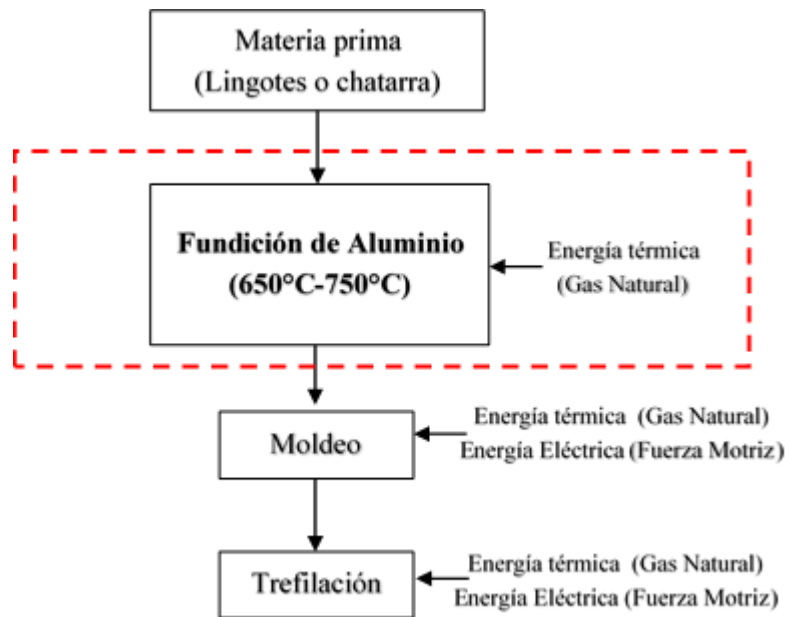


Figura 2. Proceso de fundición de aluminio

La principal característica de la producción de aluminio secundario es la diversidad de materias primas, dividiéndose en dos categorías principales: subproductos de la transformación del aluminio o chatarra nueva, donde se mencionan los productos fuera de especificación como perfiles, envases, viruta, recortes, piezas moldeadas, etc. La chatarra usada o chatarra vieja, material procedente de artículos de aluminio ya producidos, usados y/o desechados al final de su ciclo de vida; que generalmente se encuentra unido a otros materiales como el hierro, acero inoxidable, zinc, latón, plástico, pintura, esmalte, laca o revestimientos de porcelana, siendo necesario su tratamiento y separación previa, ya que estos materiales pueden reducir la recuperación del metal (Chévez Aparicio & Rodríguez Pineda, 2012). Usualmente,

los procesos de fundición a partir de chatarra nueva pueden iniciar directamente en el horno de fundición.

El aluminio y sus aleaciones se funden; posteriormente se añaden fundentes y desoxidantes especiales. La elección del tipo de fundente a utilizar depende del tipo de materia prima que se emplee en el proceso. Durante la fusión, estas aleaciones tienen tendencia a absorber hidrógeno y monóxido de carbono procedentes de la combustión del gas utilizado en el horno lo que ocasiona obtener un material poroso. Por esto es conveniente mantener el material fundido, alejado de los gases de combustión (Ryabov, Foreign Technology Division, and Wright-patterson Air Force Base 1973).

En el proceso de fundición del aluminio, la superficie de la colada debe mantenerse cubierta por una capa de fundentes protectores para evitar la oxidación del aluminio fundido ubicado en la parte superior de la colada; siendo el exacto control de temperatura un factor de gran importancia, especialmente en la fusión de aleaciones con metales que se oxidan fácilmente y los sobrecalentamientos pueden producir pérdidas considerables de metal con la consiguiente variación en la composición final y propiedades de las piezas obtenidas (Ryabov et al., 1973). Los productos obtenidos después del proceso de fundición son: aluminio líquido y escoria, esta última es una mezcla de aluminio sin reaccionar, óxidos metálicos y sales (U.S. Department of Energy, 2007).

En función de las características y la calidad de los materiales a fundir, así como el volumen de producción, existen diferentes tipos de hornos para realizar este proceso, los cuales se clasifican de acuerdo al medio de calentamiento, en hornos eléctricos entre ellos están los hornos de arco indirecto, inducción y resistencia; y los hornos de combustión, entre los que se conocen los hornos crisol, cubilote, reverbero y rotatorio. Generalmente, el combustible empleado en los hornos de combustión es gas natural. El enfoque de la investigación son los sistemas térmicos, por esto se describen los hornos de combustión en el Anexo 1.

4.1. FUNDICIÓN DE METALES FERROSOS

En el proceso de fusión de metales ferrosos, la energía requerida se descompone en: el calor sensible para alcanzar la temperatura de fusión, el calor latente para realizar el cambio de fase, y por último el calor sensible para llevar el baño del metal fundido a la temperatura de colada. En la ecuación 1 se observaron los requerimientos de energía para el proceso de fusión de aluminio, el cual aplica en el proceso de fundición de metales ferrosos como el hierro y el acero.

La temperatura de fusión del acero es de 1593°C a 1704°C, mientras la temperatura de fusión para el hierro es de 1427°C a 1510°C, la mayor temperatura de fusión del acero se debe al bajo contenido de carbono.

En un estudio realizado en Estados Unidos evaluaron la distribución de las fuentes de energía en el sector de fundiciones, donde se concluyó que el 67 % de la energía suministrada es energía eléctrica empleada solamente en la producción de hierro y acero, el 27% es gas natural para los hornos de fusión de aluminio y recalentamiento, un 5% emplea coque como fuente de energía, y el 1% restante equivale a otras fuentes de energía (Schifo & Radia, 2004). En Colombia, las empresas de fundición de metales ferrosos emplean energía eléctrica en sus procesos de fundición, y se emplea gas natural para los procesos de calentamiento o recalentamiento cuando sea necesario (Unidad de Planeación Minero Energética, 2001).

Los hornos empleados generalmente para el proceso de fusión de metales ferrosos son hornos de arco eléctrico, en ellos se funde y refina la chatarra, usando una corriente eléctrica (Worrell et al., 2008). En el proceso de refinado se eliminan materiales no deseados por ejemplo fósforo, azufre, aluminio, silicio, manganeso y carbono.

Una vez se obtiene la colada del metal ferroso (hierro o acero), se siguen dos clases de producción: una para transformar el acero en palanquillas, que son productos intermedios que constituyen la base para la elaboración de productos laminados (barras de acero lisas y corrugadas). En la segunda clase de producción se emplea la colada para la fundición de piezas de acuerdo a los requerimientos del cliente; piezas que posteriormente deben recibir tratamientos térmicos. En la Figura 3 se muestra una distribución de los procesos realizados a los metales ferrosos con su respectiva fuente de energía; se observa que la energía térmica es empleada para los procesos de calentamiento de palanquilla y tratamientos térmicos, área donde serán realizados los diagnósticos energéticos, y por ello a continuación se describen cada uno de estos procesos.

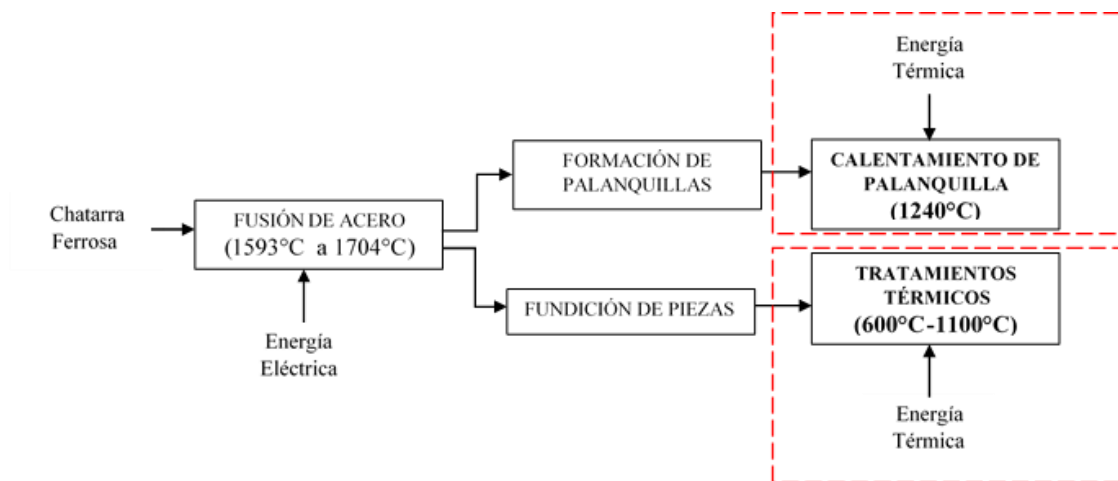


Figura 3. Procesos realizados a los metales ferrosos (hierro y acero)

4.2.1. Calentamiento de palanquilla

El proceso de calentamiento de la palanquilla para la obtención de aceros corrugados y alambrones, se realiza de manera gradual y homogénea gracias a la energía liberada en el proceso de combustión del gas natural, el objetivo es incrementar la temperatura de cada palanquilla alrededor de 1.240°C, por lo que se considera como un proceso de alta intensidad térmica. La temperatura de calentamiento de la palanquilla es

inferior a la temperatura de fusión del metal, para que el material alcance un estado donde su plasticidad permita obtener el perfil requerido.

De acuerdo a las condiciones del proceso, la energía térmica requerida se considera netamente calor sensible y se define por la ecuación 2 (“Metallurgical Industry 12.12-1,” 1991):

$$Q = mC_{ps}(T_p - T_0) \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

Q= Energía requerida para elevar la temperatura del metal a la temperatura de proceso [kJ]

m= Masa del metal que se calienta [kg]

C_{ps}= Calor específico del metal sólido [kJ/kg °C]

T_p= Temperatura de calentamiento requerida del metal [°C]

T_o= Temperatura de la palanquilla en la entrada del horno [°C]

Los hornos empleados para el calentamiento de palanquilla se clasifican de acuerdo al método empleado para transporte de la carga, entre ellos se conocen los hornos de empuje, y los hornos de vigas caminantes, en los cuales se coloca el material sobre un hogar móvil o estructura de soporte que transporta el acero a través del horno. En el Anexo 2 se realiza una descripción de cada uno de estos hornos.

4.2.2. Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos son procesos de calentamiento realizados al acero y aleaciones no férreas, para modificar microscópicamente la estructura interna de los metales, produciendo transformaciones de tipo físico, cambios de composición y propiedades, permitiéndoles conseguir mejor dureza y maquinabilidad, eliminar

tensiones internas y evitar deformaciones después del mecanizado, estructuras más homogéneas, máxima dureza y resistencia posible.

Los tratamientos térmicos son un paso fundamental para que el metal alcance las propiedades mecánicas para las cuales está creado. Existen diferentes tipos de tratamientos térmicos, algunos hacen el acero más resistente y duro, mientras otros lo hacen suave y fácil para trabajar; se clasifican en procesos térmicos y procesos termoquímicos.

4.2.2.1. Procesos térmicos

En los procesos térmicos los materiales se alteran sometiéndolos únicamente a calentamientos y enfriamientos periódicos hasta obtener la estructura cristalina deseada. Los procesos térmicos más comunes son: temple, recocido, revenido y normalizado (Maya, 2010).

Temple

Es un proceso de calentamiento seguido de un enfriamiento rápido con una velocidad mínima llamada “crítica”. El objetivo del proceso es aumentar la dureza y resistencia mecánica. El acero primero se calienta a su temperatura de endurecimiento para formar austenita. El acero posteriormente se enfría directamente o en etapas, convirtiéndose la austenita en martensita, constituyente típico de los aceros templados (Maya, 2010).

Los factores que influyen en la práctica del temple son:

- El tamaño de la pieza: la temperatura y el tiempo de endurecimiento se determinan por la templabilidad del acero y las dimensiones del objeto; es decir que cuanto más espesor tenga la pieza más hay que aumentar el ciclo de duración del proceso de calentamiento y de enfriamiento.

- La composición química del acero: en general los elementos de aleación facilitan el temple.
- El tamaño del grano: influye principalmente en la velocidad crítica del temple, tiene mayor templabilidad el de grano grueso.
- El medio de enfriamiento: Los medios más utilizados son: aire, aceite, agua, baño de plomo, baño de mercurio, baño de sales fundidas y polímeros hidrosolubles.

Recocido

El proceso de recocido consiste en reducir la dureza del acero, o dar una mejor microestructura para procesos posteriores. De esta manera se logra regenerar su estructura o eliminar tensiones internas. El proceso consiste en el calentamiento a temperaturas adecuadas, seguido de un enfriamiento lento.

El proceso de recocido maximiza la suavidad del acero. Es generalmente utilizado para aceros de baja aleación con una fracción alta de carbono. El acero es calentado a 700-800°C y se mantiene a esta temperatura durante varias horas antes que sea sometido a un proceso de enfriamiento.

Revenido

El proceso de revenido se realiza en las piezas que han sido sometidas previamente a un proceso de temple. Con este tratamiento, que consiste en un calentamiento a una temperatura inferior a la del punto crítico, se disminuye la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, quedando el acero con la dureza o resistencia deseada.

Normalizado

El proceso de normalizado consiste en el calentamiento del acero a una temperatura de 1000°C, superior a la temperatura del punto crítico y una vez autenticado se deja enfriar al aire libre. Este tratamiento consigue afinar y homogenizar la estructura; y es

un tratamiento típico de los aceros al carbono de construcción de 0,15% a 0,60% de carbono (Maya, 2010).

4.2.2.2. Procesos termoquímicos

En los procesos termoquímicos se producen cambios en la estructura del material y la composición química de la capa superficial. En los procesos termoquímicos se conocen: cementación, nitruración y cianuración (Maya, 2010).

Cementación

El proceso de cementación consiste en el endurecimiento de la superficie externa del acero al bajo carbono, quedando el núcleo blando y dúctil. Como el carbono es el que genera la dureza en los aceros, en el método de cementado se tiene la posibilidad de aumentar la cantidad de carbono en los aceros de bajo contenido de carbono antes de ser endurecido. El carbono se agrega al calentar el acero a su temperatura crítica mientras se encuentra en contacto con un material carbonoso.

Cianuración

La cianuración es una forma de endurecimiento donde se añade carbono y nitrógeno al acero; lo cual se consigue en una atmósfera que contiene amoníaco. Posteriormente hay que templar las piezas, realizando la etapa de calentamiento en un rango de temperatura entre 850-950°C. El acero logra obtener una capa superficial con mayor contenido de carbono que el núcleo de la pieza. Esto resulta en una superficie más dura, más suave y núcleo más resistente. Adicionalmente se logra eliminar la oxidación.

Nitruración

La nitruración se realiza para incrementar la resistencia a la fatiga y la capacidad de carga del acero. La nitruración es un proceso donde el nitrógeno es adicionado a la superficie del acero desde una atmosfera que lo contiene. El proceso es usualmente llevado a cabo a una temperatura de 500-550°C. Amonio diluido con hidrógeno o nitrógeno gaseoso, es el medio donador de nitrógeno. La atmosfera está completamente libre de oxígeno para evitar el riesgo de explosión. La concentración de amonio es alta al inicio del proceso y decrece al final. La nitruración continúa hasta que se alcanza una profundidad de nitrógeno deseable. El gas de amonio es luego removido del horno, y el acero se lava con nitrógeno gaseoso. El enfriamiento es usualmente realizado con nitrógeno gaseoso.

En el sector metalmecánico, en lo que corresponde a los tratamientos térmicos, existen diversas tecnologías de nueva generación y alta eficiencia energética

4.3. NORMATIVA PARA EL DESARROLLO DEL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO

En el diagnóstico energético del sector industrial de fundición de metales ferrosos y no ferrosos se tienen en cuenta los procesos y equipos en los cuales se emplea energía térmica; el análisis energético se realiza con la aplicación de la norma internacional estándar ISO 13579-1, donde se establece la metodología de medición y cálculo de las pérdidas de energía térmica y se evalúa la eficiencia del proceso.

4.3.1. Norma internacional estándar ISO 13579: metodología del balance de energía-cálculo de eficiencia

La norma ISO 13579 especifica la metodología general para medir el balance de energía y calcular la eficiencia del proceso en los hornos industriales(International Standart Organization, 2009). Esta metodología consiste en determinar el área del balance de energía con las energías que entran y salen de ella. El tipo de energías evaluadas en la norma se especifican a continuación.

4.3.1.1. Energías de entrada

Entre las energías de entrada al proceso se tienen:

Energía equivalente del combustible

Energía agregada a la entrada del proceso, la cual se cuantifica con base al poder calorífico neto o inferior del combustible, o el poder calorífico de los residuos que se empleen como fuente de energía.

El cálculo de la energía de entrada se realiza de acuerdo a la ecuación 3.

$$E_{h,fuel} = V_f * H_l$$

Ecuación 3

Dónde:

V_f = consumo de combustible por tonelada de producto.

H_l = poder calorífico neto o inferior por unidad de combustible.

En combustibles en estado gaseoso debido a la baja incidencia de la humedad en la disminución del poder calorífico del combustible, puede emplearse el poder calorífico superior en equivalencia al poder calorífico inferior. Sin embargo, para los combustibles en estado sólido el contenido de humedad es un parámetro preponderante, por lo cual no se puede realizar la equivalencia entre el poder calorífico superior e inferior.

Otras energías de entrada

Energías formadas a partir del calor sensible del combustible, calor sensible del aire de combustión u otros agentes oxidantes. En los sistemas convencionales del sector fundiciones no se emplea energía térmica a partir del calor sensible del combustible. En su lugar, las otras energías de entrada provienen de calor sensible del aire de combustión, el cual es calentado en intercambiadores de calor con los gases de combustión.

El calor sensible del aire de combustión se calcula usando la ecuación 4.

$$E_{S,air} = A C_{pm,a1}(T_{a1} - T_R) \quad \textbf{Ecuación 4}$$

Dónde:

A= Volumen del aire de combustión por tonelada de producto.

$C_{pm,a1}$ = Calor específico promedio del aire entre la temperatura de entrada y la de referencia.

T_{a1} = Temperatura de entrada del aire.

T_R = Temperatura de referencia, correspondiente a la temperatura ambiente.

4.3.1.2. Energías de salida

Entre las energías de salida están:

Energía Útil:

Energía que ganan los metales ferrosos o no ferrosos para su calentamiento en tratamientos térmicos, o cambios de estado físico en el área del balance de energía.

Pérdida de energía por paredes

Energía térmica emitida desde la superficie del horno industrial por radiación y convección.

El cálculo del calor emitido por radiación y convección desde la superficie de la pared del horno, Q_e , se realiza de acuerdo a la ecuación 5.

$$Q_e = \sigma \varepsilon_1 (T_w^4 - T_R^4) + h_{co} (T_w - T_a)^{5/4} \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:

σ = Constante de Stephan-Boltzmann $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

ε = Emisividad de la superficie del horno.

h_{co} = Coeficiente de transferencia de calor por convección, los cuales se especifican de acuerdo a la ubicación de la pared como se observa a continuación:

Pared superior del horno $h_{co}=3,26 \text{ W/m}^2\text{K}$

Pared lateral del horno $h_{co}=2,56 \text{ W/m}^2\text{K}$

Pared inferior del horno $h_{co}=1,74 \text{ W/m}^2\text{K}$

T_w = Temperatura superficial de la pared del horno.

T_a = Temperatura ambiente.

Pérdida de energía por radiación en la apertura del horno

Energía térmica emitida por radiación en la apertura del horno. Dentro del concepto de aperturas en los hornos se incluyen las puertas principales de carga y descarga, las puertas auxiliares de inspección, los dinteles de separación entre zonas de diferentes temperaturas, las ranuras longitudinales y transversales de vigas galopantes.

Pérdida de energía en el agua de enfriamiento

Energía térmica retirada del área del balance de energía, es decir horno u equipo donde se realice el proceso, por medio del agua de enfriamiento para mantener una temperatura baja, y proteger los elementos de la acción directa de las llamas o de la

temperatura. El cálculo de la pérdida de energía en el agua de enfriamiento se realiza de acuerdo a la ecuación 6.

$$E_{l,cw} = 4,186 * V_{CW}(T_{water,out} - T_{water,in}) \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde:

V_{cw} = Cantidad de agua usada por tonelada de producto.

$T_{water,out}$ = Temperatura del agua de enfriamiento a la descarga.

$T_{water,in}$ = Temperatura del agua de enfriamiento en el suministro.

Pérdida de energía en los gases de combustión

La pérdida de energía en los gases de combustión se conforma por: el calor sensible que ganan los gases en el área del balance de energía, el cual depende de su temperatura; el calor latente de vaporización del agua, debido al agua que contiene el aire de combustión, la cual incrementa su temperatura hasta la temperatura de los gases; y la formación de vapor de agua durante la combustión del hidrógeno contenido en el combustible; y por último la pérdida de energía en los productos de la combustión incompleta. La pérdida de energía en los gases de combustión se evalúa de acuerdo a la ecuación 7.

$$Q_g = P_{CO} + P_{CS} + P_{H_2O} \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

P_{co} = Pérdidas por CO en los gases [kW/t]

P_{cs} = Perdidas de calor sensible en los gases de combustión [kW/t].

P_{H_2O} = Pérdida de energía debido al calor latente de condensación del agua, dado que el sistema de combustión es sin condensación [kW/t].

Otras pérdidas de energía

Pérdidas de energía térmica no cuantificadas en el área del balance de energía, las cuales se evidencian en el balance de materia y energía como desbalance.

Entre las diferentes pérdidas de energía consideradas en la norma para el diagnóstico energético se evalúan finalmente como fuentes de pérdidas: pérdida de energía térmica por paredes, donde se incluyen pérdidas de energía por radiación y convección desde la superficie de la pared, las pérdidas de energía en gases de combustión, donde se tienen en cuenta las pérdidas de energía debido al calor sensible que ganan los gases de combustión, el calor latente debido al cambio de estado del vapor de agua, y la pérdida de energía en los productos de la combustión incompleta. Se incluye un ítem de otras fuentes de pérdidas de energía o desbalance, donde se tienen en cuenta pérdidas de energía debido a la apertura del horno; las cuales no fueron evaluadas debido a la variabilidad en la apertura de los equipos, sin llegar a ser estos procesos muy frecuentes que impidan la estabilidad de los sistemas. Y las pérdidas de energía en calor sensible en el aire de infiltración, éstas no se tendrán en cuenta dado que no fue cuantificado el volumen de aire de infiltración.

4.3.1.3. Eficiencia térmica

La eficiencia térmica de un horno corresponde a la relación del calor aprovechado por los metales del proceso, y el calor suministrado por el combustible. El área del balance de energía térmica es equivalente a la cámara del horno industrial. La eficiencia se evalúa usando la ecuación 8.

$$\eta_1 = \frac{\text{Energía útil}}{\text{Energía de entrada} - \text{Energía regenerada}} \quad \text{Ecuación 8}$$

El término de energía regenerada hace referencia a la energía recuperada a partir de la energía térmica desperdiciada por tonelada de producto. Un ejemplo de esto es la energía térmica recuperada de los gases de combustión para el calentamiento del aire de combustión.

4.3.1.4. Eficiencia de combustión

Indica la capacidad de un sistema de combustión (quemadores) para liberar la totalidad de energía disponible en el combustible, expresado mediante la siguiente ecuación 9:

$$E_c = 100 - P_{CO} - P_{CS} - P_{H_2O} \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

P_{CO} Pérdidas por CO en los gases (%)

P_{CS} Pérdidas de calor sensible en los gases de combustión (%).

P_{H_2O} Pérdida de energía debido al calor latente de condensación del agua, dado que el sistema de combustión es sin condensación (%).

5. METODOLOGÍA

La metodología seguida para realizar el proyecto de investigación contemplo la realización de un diagnóstico energético en los procesos que emplean energía térmica en las empresas participantes, el cual se realizó en varias etapas que serán detalladas en este capítulo. Los resultados del diagnóstico energético serán la herramienta fundamental para identificar las propuestas de ahorro de energía térmica en la industria de fundiciones en el Valle del Cauca y Cauca.

En la identificación de las propuestas de ahorro de energía se evalúa el área donde se tienen mayores potenciales de ahorro de energía térmica por tonelada producto. Una vez identificada el área se presentan las propuestas para el ahorro de energía térmica, y se evalúan los costos de energía ahorrada, potenciales costos de inversión y el tiempo de retorno de la inversión al implementar las propuestas en cada una de las empresas. Finalmente se formula un programa de ahorro de energía térmica en la industria de fundiciones, donde se presentan las propuestas más factibles de acuerdo a los indicadores mencionados.

El diagnóstico energético al sector industrial de fundiciones en el Valle del Cauca y Cauca fue realizado a las empresas participantes del proyecto en las siguientes etapas:

5.1. Identificación de las empresas.

En las potenciales empresas participantes del proyecto se envió una carta de invitación desde la dirección general de la Unión Temporal Incombustión a la gerencia de cada una de las empresas. Al recibido de la carta de invitación se propone una reunión de presentación del proyecto, donde se decide la participación en el mismo, se aporta la información técnica necesaria y se autoriza la realización de la etapa de mediciones.

En esta sección se reconoce nombre y tamaño de la empresa participante, proceso realizado, y tipo de metal procesado.

5.2. Metodología de mediciones para la realización del diagnóstico energético.

Las visitas de diagnóstico energético se realizaron entre el año 2015 y 2016, donde se registraron las siguientes variables:

- Composición y temperatura de los gases de combustión usando un analizador de gases portátil Bacharach PCA®3. Se reporta la temperatura de salida de los gases de combustión y la composición volumétrica de cuatro de sus componentes: oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de azufre y monóxido de nitrógeno en base seca, medidas realizadas por los sensores electroquímicos del equipo.
- Temperaturas de pared en los hornos por medio de un pirómetro marca Fluke 568 y una cámara termográfica marca Fluke TI 90.
- Medición de temperatura ambiente y humedad relativa con un higrómetro marca CEM DT-171.
- Consumo de combustible durante el periodo de prueba. El combustible empleado en los procesos del sector de fundiciones es gas natural. Debido a su estado físico, no se realiza análisis en el laboratorio de combustión combustibles de la Universidad del Valle. Por lo tanto, se identifica el proveedor del combustible, con el fin de conocer su composición y poder calorífico superior. Los periodos de prueba varían en función de las condiciones de operación en cada una de las empresas.
- El nivel de producción durante el periodo de prueba; es muy importante distinguir entre procesos tipo batch, y los procesos continuos para establecer una correcta

velocidad de producción y condiciones para la elaboración del balance de materia y energía.

5.3. Reconocimiento de la tecnología utilizada

El subsector industrial de fundiciones realiza diversos tipos de procesos a los metales y de acuerdo a ello se selecciona la tecnología. Entre los procesos realizados en las empresas participantes del proyecto se tiene la fundición de aluminio, el calentamiento de palanquilla para la producción de barras de acero lisa o corrugada, y los tratamientos térmicos. En función de estos procesos se describe la tecnología empleada en cada una de las empresas.

5.4. Balances de materia y energía

De acuerdo a las mediciones realizadas, el poder calorífico superior del combustible, y la norma internacional estándar ISO 13579 se realizan los balances de materia y energía en los equipos. Los resultados se muestran en relación a la producción, para evitar distracciones por los diferentes niveles de producción de las empresas y poder realizar comparaciones.

En esta sección también se muestra los resultados del análisis de gases de combustión, y la relación aire –combustible real y estequiométrica, con el fin de evaluar el exceso de aire.

5.5. Indicadores de consumo de energía térmica

En las empresas participantes del proyecto se solicitó información del consumo de combustible los últimos 12 meses del año, y la producción asociada a ellos para el mismo periodo de tiempo, con esta información se construye un indicador de intensidad energética térmica. La intensidad energética térmica es el cociente entre el

consumo de energía térmica en el periodo especificado y la producción alcanzada en dicho periodo.

El indicador de la intensidad energética térmica durante los últimos 12 meses del año se grafica respecto a la producción realizada en ese mismo periodo. De esta forma se revela información importante sobre la eficiencia del proceso, ya que se determina en qué medida la variación de los consumos energéticos se debe a variaciones de la producción; al realizar una línea de tendencia entre los indicadores, y evaluar el coeficiente de correlación R mayor de 0.85. Si se cumple esta condición podemos decir que hay una buena correlación y pueden realizarse proyecciones futuras con base en los indicadores.

En el gráfico se logran identificar comportamientos atípicos como son:

- La razón de variación de intensidad energética térmica y producción, ambos creciendo o decreciendo.
- Sostenimiento de la intensidad energética térmica al incrementar el volumen de producción.
- Diferentes indicadores de intensidad energética térmica a un mismo nivel de producción.

Una vez se determinan los datos típicos se calcula el porcentaje de estos sobre el total de la muestra y se obtiene el porcentaje de fiabilidad, que permite establecer si el total de la muestra cuenta con la validez necesaria para realizar la caracterización energética. Se considera un porcentaje de fiabilidad deficiente por debajo del 80% (Unidad de Planeación Minero Energética., Prias Caicedo, & GIEN., 2011).

En los siguientes capítulos se detalla cada una de las actividades realizadas.

6. DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO AL SUBSECTOR INDUSTRIAL DE FUNDICIONES.

De acuerdo a la metodología se muestra a continuación cada una de las etapas en las cuales fue realizado el diagnóstico:

6.1. IDENTIFICACIÓN DE LAS EMPRESAS

En el sector industrial de metales ferrosos se conocen en Colombia cinco grandes siderúrgicas entre las cuales están Gerdau Diaco, Acerías Paz del Río, Siderúrgica Nacional-Sidenal, Prodeco, y Siderúrgica de Occidente-Sidoc. En la fundición de metales no ferrosos se conocen dos grandes empresas, las cuales son Alúmina ubicada en la zona industrial de Yumbo, y Reynolds de Barranquilla (Corcho Tróchez, 2014).

En el proyecto de diagnósticos energéticos en los sectores industriales Colombianos, realizado por la Unión Temporal Incombustion, en el subsector de fundiciones de metales ferrosos y no ferrosos, participaron un total de doce empresas a nivel nacional, en los departamentos de Antioquía, Boyacá, Cundinamarca, Cauca y Valle del Cauca. En el departamento de Antioquia se contó con la participación de tres empresas entre ellas: Fundacol S.A.S, Fundiciones Industriales S.A.S, y Laminación de Colombia S.A. En Boyacá participó Siderúrgica Nacional S. A, en Cundinamarca participaron tres empresas entre ellas Óxidos y Metales S.A.S, Gerdau Diaco S. A, sede Muña, y Gerdau Diaco S.A, sede Tocancipá. En los departamentos de Cauca y Valle del Cauca participaron cinco de estas doce empresas, entre las cuales están Alúmina S. A, Propulsora S. A, Siderúrgica de Occidente Sidoc S. A, Gerdau Diaco S. A sede Yumbo, y por ultimo Fundiciones Universo S.A. Las empresas de la región

del Valle del Cauca y Cauca fueron intervenidas por el grupo de diagnósticos de la Universidad del Valle, y forman parte de este proyecto de grado.

Las empresas intervenidas tienen una diversidad de procesos productivos, haciendo necesario una clasificación de las empresas por el tipo de metal procesado, y el proceso térmico realizado. Entre los diferentes tipos de procesos elaborados en las empresas del sector fundiciones, están los procesos de fundición de aluminio o acero, para la elaboración de lingotes con los cuales posteriormente se construyen diversas piezas y materiales. El calentamiento de palanquilla para la obtención de aceros corrugados y alambrones. Y por último, los tratamientos térmicos para potencializar las propiedades físicas y química de los metales. La descripción detallada de estos procesos se realizó en el marco conceptual, sección 3.

Las empresas participantes en el sector de fundiciones de metales ferrosos y no ferrosos en los departamentos del Cauca y Valle del Cauca, con la respectiva clasificación del metal y proceso realizado se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Empresas participantes en el subsector de fundiciones en el Valle del Cauca y Cauca.

EMPRESA	TAMAÑO SEGÚN ACTIVOS	PROCESO	METAL
Alúmina S. A	Grande	Fundición	Aluminio
Propulsora S. A	Mediana	Fundición	Aluminio
Gerdau Diaco S. A -Yumbo	Grande	Calentamiento Palanquilla	Acero
Sidoc S. A	Grande	Calentamiento Palanquilla	Acero
Fundiciones Universo S. A	Grande	Tratamiento térmico de revenido	Acero

Alúmina S. A es una empresa grande dedicada a la fabricación de diferentes productos como cubiertas, láminas, diseños estructurales, productos de conducción eléctrica, agroindustria, preparación y conservación de alimentos. Los cuales son

elaborados a partir de aluminio nacional, importado y residuos del área de laminación. Propulsora S. A es una empresa dedicada a la fundición de chatarra para la fabricación de aleaciones de aluminio, zinc y estaño para la industria nacional e internacional, protección catódica, y soldaduras. La chatarra empleada como materia prima en Propulsora S. A combina diferentes materiales con presencia de pintura, y otros contaminantes, y se compra en ciudades como Bogotá, Medellín, y Cali, para su posterior clasificación en el centro de acopio.

Entre las empresas del sector de fundición de metales ferrosos se contó con tres grandes siderúrgicas a nivel nacional como son Gerdau Diaco S. A, Siderúrgica de Occidente –Sidoc S. A y Fundiciones Universo S. A. En Gerdau Diaco S. A y Siderúrgica de Occidente –Sidoc S. A están dedicadas a la fabricación y comercialización de aceros estructurales. El acero se funde y se forman palanquillas, las cuales son calentadas posteriormente e introducidas al área de laminación donde se forman las barras de acero corrugado, lisas y alambrones. Fundiciones Universo S. A, es una empresa de fundiciones de materiales ferrosos (hierro y acero), y múltiples aleaciones; dedicada a la fabricación de piezas para la diferentes industrias nacionales e internacionales. A las piezas les realizan diferente tipos de tratamientos térmicos para proporcionarles resistencia al desgaste, abrasión y al calor.

6.2. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA UTILIZADA.

A continuación se presenta una descripción de la tecnología empleada en las diferentes empresas, clasificadas de acuerdo al proceso realizado, con la ficha técnica de cada uno de los equipos.

6.2.1. Descripción de la tecnología utilizada en la fundición de metales no ferrosos

En las empresas participantes del proyecto en sector de fundición de metales no ferrosos se enfocan principalmente a la fundición de aluminio. La tecnología empleada son hornos tipo reverbero, que utilizan como combustible gas natural. Alúmina S. A posee tres (3) hornos, denominados horno 610, 612 y 1070. El agente oxidante en el caso del horno 610 y 612 es aire del ambiente, mientras que el horno 1070 utiliza la tecnología de oxidación. El gas natural es suministrado por la comercializadora Fenosa y el oxígeno por la empresa Praxair. En Propulsora S. A se cuenta con un (1) horno tipo reverbero, en donde el agente oxidante es aire ambiente, y el gas natural es suministrado por Gases de Occidente S.A. Las descripciones técnicas de los hornos se muestran en la Tabla 2.

Los hornos de Alúmina S. A, tienen un mayor tiempo de operación promedio mensual, debido a que son hornos de operación continua 24 horas al día, 7 días de la semana, siempre y cuando no se presente ningún percance de mantenimiento. En Propulsora S. A, el tiempo de operación del horno es 22 horas/ día, 6 días de la semana; con paros de fábrica semanales. Los hornos están fabricados de una aleación de acero en sus paredes, aisladas con ladrillo refractario silicoaluminoso y el crisol está construido con ladrillo refractario.

La materia prima empleada para la fusión del aluminio en Alúmina S. A es aluminio nacional, importado y residuos del área de laminación. Mientras en Propulsora S. A, se emplea chatarra, producto del reciclaje en diversas ciudades del país como es Cali, Bogotá, y Medellín, la cual es posteriormente clasificada para evitar la contaminación del material con aceites de motor, acero, pintura, etc. El material es adicionado al horno utilizando un montacarga que lo transporta desde la zona de almacenamiento.

Tabla 2. Características de los hornos de fundición de aluminio en Alumina y Propulsora S.A.

Empresa/ Característica	Alúmina S. A			Propulsora S. A
	Horno 610	Horno 612	Horno 1070	Horno 6
Tipo	Reverbero	Reverbero	Reverbero	Reverbero
Carga nominal (t)	21	16	26	6
Año de Fabricación	1995	1995	1997	2010
Capacidad térmica instalada [kW]	5861	5861	--	1720
Tipo de Quemador	Dual	Dual	Dual	Dual
N° de Quemadores	2	2	2	2
Tiempo residencia material (h)	7	7	7	18
Presión inicial del gas (psi)	17	17	17	20
Temperatura entrada de chatarra (°C)	29-30	29-30	29-30	34,5
Temperatura de salida de la carga (°C)	730-750	730-750	730-750	770
Material por colada (t)	18,1	16,5	23,0	7,8
Factor de carga (%)	86,2	103,4	88,0	130
Consumo agua promedio (m³/h)	260	260	260	
Combustible	Gas Natural	Gas Natural	Gas Natural	Gas Natural
Flujo de combustible (m³/h)	163,1	182,4	82.6	68
Temperatura de Operación (°C)	734	735	766	879
Horas de operación [mes]	525	572	700	225
Área del horno (m²)	146	146	134	69,2
Mantenimiento	Correctivo	Correctivo	Correctivo	Correctivo

La etapa de fusión del aluminio se realiza en los hornos 610 y 612 de Alúmina S. A, y en el horno 6 de Propulsora S. A. por lotes de forma continua, es decir que todo el

material cargado es descargado durante la colada e inmediatamente el horno vuelve a ser cargado con material nuevo permitiendo el aprovechamiento del calor residual acumulado en el refractario del horno. Sin embargo, en Propulsora S. A se ocasiona una gran pérdida de energía durante los paros semanales de planta.

En el horno 1070 de Alúmina S. A, se emplea una técnica de colado continuo, en el cual se deja siempre un remante de aluminio fundido en el horno, aprovechando de esta manera la inercia térmica de la colada.

6.2.2. Descripción de la tecnología utilizada en el calentamiento de palanquilla

En las empresas participantes para la fundición de metales ferrosos en el proceso de calentamiento de palanquilla se encuentran Siderúrgica de Occidente S. A, o más conocida como Sidoc S. A y Gerdau Diaco S. A sede Yumbo. Los hornos empleados son conocidos como hornos tipo empuje, de solera fija.

Sidoc S. A posee dos (2) hornos tipo empuje, de solera fija. Sin embargo, en el desarrollo del proyecto por razones de seguridad y acceso al equipo se realiza solo el diagnóstico energético al horno de palanquilla #2. El horno 2 de Sidoc S. A, tiene una capacidad de 16,5 t/h, es decir 62 piezas de acero en una hora. Este horno está construido en ladrillo refractario y manta aislante, revestido exteriormente de lámina de acero. Los hornos de calentamiento de palanquilla se encuentran divididos en tres zonas conocidas como: zona de precalentamiento, calentamiento e igualación. A lo largo de estas zonas se encuentran ubicados los quemadores, con los cuales se logra el incremento gradual de la temperatura. Generalmente, en la zona de precalentamiento no se ubican quemadores; el proceso de calentamiento se realiza por convección con los gases calientes producto de la combustión en la zona siguiente (zona de calentamiento). El horno tiene un total de nueve (9) quemadores que emplean gas

natural, seis (6) en la zona de calentamiento, y tres (3) quemadores en la zona de igualación. El horno posee un sistema de recuperación de calor, el cual calienta el aire que ingresa a la combustión, hasta una temperatura promedio de 390°C.

Gerda Diaco S. A, posee un (1) horno de recalentamiento de palanquilla, con una capacidad de 40 t/h, cada palanquilla tiene un peso de 495 Kg, es decir que tiene una capacidad para 80 palanquillas. Este horno tiene un total de 18 quemadores duales, para combustibles líquidos (fuel oil) y gaseosos (gas natural). La zona de precalentamiento posee 6 quemadores en las paredes laterales del horno, y la temperatura promedio de la palanquilla alcanza los 923°C, en la zona de calentamiento se encuentran 8 quemadores ubicados igualmente en las paredes laterales de forma simétrica para elevar la temperatura de la carga hasta 1.205°C y en la zona de igualación hay 4 quemadores frontales para homogenizar la temperatura de la palanquilla antes de salir del horno, la temperatura de salida de la palanquilla es de 1243°C. Al igual que el horno #2 de Sidoc S. A, el horno de Gerda Diaco S. A posee un sistema de recuperación de calor, por medio de un intercambiador de calor de coraza y tubos para calentar el aire antes de ingresar a los quemadores. El aire precalentado ingresa al horno a una temperatura de 339°C. En la Tabla 3 se presentan las descripciones técnicas de los hornos de palanquilla en Sidoc S. A y Gerda Diaco S.A.

El horno de Gerda Diaco S. A, posee un sistema de control de la combustión en cada zona del horno; de esta forma se cuenta con medidores de consumo de gas natural en cada una de las zonas, y control en la apertura del damper del aire de combustión. En cambio, el horno de recalentamiento de palanquilla en Sidoc S. A no posee un medidor de consumo de gas natural y no se observan controles sobre la relación aire/combustible.

Tabla 3.Características de los hornos de calentamiento de palanquilla en Sidoc S. A y Gerdau Diaco S. A

Empresa	Sidoc S. A	Gerdau Diaco S. A
Tipo	Empuje, solera fija Salida Lateral	Empuje, solera fija Salida Lateral
Marca	Prosertech	Bendotti
Capacidad máxima de producción [t/h]	16,5	40
Fecha de fabricación	2005	1997
Capacidad térmica instalada [kW]	12.000	18.131
Tipo de Quemadores	Dual, Premezcla con aire caliente en recuperador	
Combustible	Gas natural Crudo castilla (alternativo)	Gas natural Fuel Oil
Zonas de control de combustión	2 (Calentamiento, igualación)	3 (Precalentamiento, calentamiento e igualación)
Numero de quemadores	9	18
Tiempo entre palanquillas [h]	1,6*10-2	3,1*10-2
Tiempo de permanencia [h]	2,50	2,5
Consumo de gas natural con recuperador [m³/h]	770,4	1153,5
Temperatura inicial [°C]	81,53	38,3
Temperatura de proceso [°C]	1.150	1.250
Mantenimiento	Mensual	Mensual

6.2.3. Descripción de la tecnología utilizada en los tratamientos térmicos

Entre las empresas participantes del sector industrial de fundición de ferrosos, dedicadas a la realización de tratamientos térmicos al acero se encuentra Fundiciones Universo S.A. La empresa cuenta con tres hornos de solera móvil para la realización de tratamientos térmicos, como el revenido, normalizado, temple y recocido. Durante la visita de diagnóstico se encuentra en operación solo uno de los hornos, debido a la programación del proceso de producción. Por lo cual, el diagnóstico energético se realiza en dicho equipo, denominado horno 1 en la empresa. Este horno fue construido artesanalmente por el personal de la misma compañía en el año 1996; y funciona 16,5 horas al día, 7 días de la semana, de acuerdo a la programación de la producción y mantenimiento.

El horno está fabricado de una aleación de acero en sus paredes, con unas dimensiones de 1,85 m de alto, 1,58 m de ancho y 2,37 m de profundidad. El material aislante es manta cerámica de 0,27 m de espesor. La solera móvil, corresponden a un carro o base de acero con rieles, donde las piezas ingresan y salen del horno, y sirve como suelo en el horno. En la parte superior de la solera móvil se encuentra una capa de ladrillo refractario de alta alúmina de 0,30 m de espesor. El horno emplea como fuente de energía térmica gas natural. En la Tabla 4 se muestra la descripción técnica del horno 1, para tratamientos térmicos en Fundiciones Universo S.A.

El gas natural es suministrado por Gases de Occidente S. A, y el horno posee un sistema de control de la temperatura de proceso por medio de un sistema on/off de los quemadores de gas natural.

Tabla 4. Características del horno 1 de tratamientos térmicos en Fundiciones

Universo S.A.

CARACTERÍSTICA	HORNO 1
Tipo de horno	Solera Móvil
Marca quemadores	Eclipse-ThermJet
Año de fabricación	1996
Capacidad térmica instalada [kW]	600
Combustible	Gas Natural
Número de quemadores	4
Flujo de combustible (m³/h)	9,33
Factor de carga (%)	18,4
Temperatura entrada de carga (°C)	51,4
Temperatura de salida de la carga (°C)	646
Temperatura aire de entrada (°C)	29,7
Temperatura de operación (°C)	650
Área del horno (m²)	5,24

6.3. ANÁLISIS DE MEDICIONES, BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA.

A continuación se presentan los resultados y análisis del diagnóstico energético realizado a las empresas participantes del proyecto en los departamentos del Valle del Cauca y Cauca, a partir de la información brindada por ellas, las mediciones realizadas y la aplicación de la metodología de la norma internacional estándar ISO 13579-1.

6.3.1. Fundición de metales no ferrosos.

A continuación se presentan los resultados de las mediciones, balances de materia y energía a las empresas del Valle del Cauca y Cauca del sector de fundición de no ferrosos, aluminio.

6.3.1.1. Gases de combustión

Se presenta en la Tabla 5 los resultados de la temperatura y la composición volumétrica de los gases de combustión de los hornos, los cuales fueron censados con el analizador de gases portátil. Los gases de combustión medidos son el monóxido de carbono, oxígeno, dióxido de azufre y monóxido de nitrógeno en base seca, puesto que son medidas realizadas por los sensores electroquímicos del equipo.

Tabla 5. Composición y temperatura de los gases de combustión en los hornos de Propulsora S. A y Alúmina S. A

Compuesto	Propulsora S. A		Alúmina S. A	
	Horno 6	Horno 610	Horno 612	Horno 1070
Monóxido de carbono-CO (ppm)	1,89	1.721,10	2.144,10	6,80
Oxígeno-O ₂ (%)	11,18	2,21	2,90	5,10
Dióxido de azufre-SO ₂ (ppm)	0,85	186,40	298,70	0,30
Monóxido de nitrógeno-NO (ppm)	32,28	30,90	20,70	278,00
Temperatura (°C)	648,54	997,50	1.095,80	752,40

*Con oxígeno de referencia del 11%.

La concentración de oxígeno en los hornos 610 y 612 de Alúmina S. A de acuerdo a los resultados que se muestran en la Tabla 5 son de 2,21% y 2,90%, con una concentración de monóxido de carbono de 1.721,10 ppm y 2.144,10 ppm respectivamente. Este resultado coloca en evidencia un proceso de combustión incompleta debido a la concentración de oxígeno. El horno 1070 de la misma compañía, tiene una concentración adecuada de oxígeno en los gases de combustión, con una respectiva baja concentración de CO en el gas. Al poseer el horno 1070 un sistema de oxicomustión, no hay presencia de nitrógeno en el agente oxidante, y es

de esperar una baja concentración de óxidos de nitrógeno en los gases., sin embargo, contrario a lo esperado la concentración de óxidos de nitrógeno es mayor en el horno 1070; por lo cual se concluye que existe un alto nivel de infiltraciones en el horno. Respecto al horno 6 de Propulsora S. A, se presenta una concentración oxígeno en los gases de 11,18% representando un alto porcentaje de exceso de aire ya que el recomendado en un proceso de combustión con gas natural es entre el 10%-30%, con un correspondiente porcentaje de oxígeno en el flujo de gases entre el 2-7 % (Wu, Biteau, & Utiskul, 2012).

6.3.1.2. Exceso de aire

El exceso de aire es normalmente requerido para asegurar un proceso de combustión completa. El aire en exceso suministrado proporciona una cantidad de oxígeno (O_2) sin reaccionar y nitrógeno (N_2) en el flujo de gases, los cuales reducen la eficiencia de combustión. Para garantizar un equilibrio en el proceso se define la relación aire-combustible molar estequiométrica, la cual indica la relación teórica mínima para que se lleve a cabo la combustión completa del combustible en condiciones ideales; y con base en esta se definen los excesos de aire recomendados a los diferentes combustibles. En los diagnósticos energéticos realizados se evaluó la relación aire-combustible molar estequiométrica, de acuerdo a la composición del gas natural en cada una de las empresas, se comparó con la relación de aire-combustible real para el proceso, calculada a partir de las emisiones registradas con el equipo de medición y la composición elemental del gas natural. Los valores de cada uno de los parámetros se reportan en la Tabla 6.

Tabla 6. Relación aire-combustible molar en los hornos de Alúmina S. A y Propulsora S.A.

Empresa	Equipo	A/C Estequiométrica	A/C Real	% Exceso de aire
Alúmina S. A	Horno 610	10,75	11,83	10,04
	Horno 612	10,75	12,25	13,91
	Horno 1070	2,26	2,32	2,77
Propulsora S. A	Horno 6	10,74	21,72	102,29

La relación aire-combustible estequiométrica molar en el proceso de combustión con gas natural es de 10,74-10,75 en relación a la variación en la composición del gas. En el horno 1070 de Alúmina S. A, se calculó la relación oxígeno-combustible en 2,26, inferior a los hornos 610 y 612 debido a que no hay presencia de nitrógeno en el agente oxidante. El porcentaje de exceso de aire en los hornos 610 y 612 de Alúmina S. A, es de 10,04 % y 13,91%, respectivamente. De acuerdo al análisis en los gases de combustión se considera un bajo porcentaje de exceso de aire, debido a la presencia de monóxido de carbono en los gases (ver tabla 5), el cual proviene de la combustión incompleta del combustible.

En el horno 6 de Propulsora S. A, se calculó un exceso de aire del 102,29%. Aunque la presencia de monóxido de carbono en los gases de combustión es baja, 1,89 ppm; el porcentaje de exceso de aire es bastante alto para un proceso de combustión con gas natural, lo que podría ocasionar un incremento en las pérdidas de energía en gases combustión.

6.3.1.3. Balance de materia y energía

El balance de masa de la reacción de combustión del gas natural durante el proceso de fundición del aluminio se realizó con base al consumo específico de combustible

registrado durante la visita, la composición del combustible suministrada por el proveedor en la fecha del diagnóstico, las emisiones de gases de combustión medidas en el horno, y los reportes de producción suministrados por la empresa. Una vez realizados los balances de masa, los cuales se muestran en el Anexo 4. Se realiza el balance de energía en el horno, en función del poder calorífico superior del gas natural. En la Figura 4 se muestra el consumo específico térmico de los hornos de fundición de aluminio en Alumina S.A. Estos datos se comparan con el estándar internacional del consumo específico en hornos reverberos con quemadores regenerativos y sistemas de control para fundición de aluminio secundario (chatarra nueva), el cual se encuentra en 2,5 GJ/tonelada (Worrell et al., 2008).

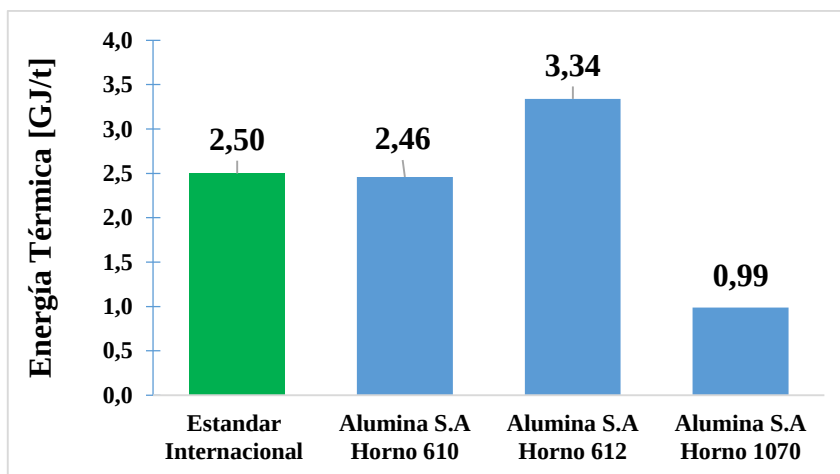


Figura 4. Consumo específico térmico en hornos de fundición de aluminio a partir de chatarra nueva en Alúmina S.A.

Respecto a los consumos térmicos específicos de los hornos de Alumina S. A qué se muestran en la Figura 4, se observa que el horno de oxicomustión, horno 1070, posee un consumo específico menor al estándar internacional, reflejando la eficiencia del proceso con dicha tecnología. El horno 610 de la misma empresa tiene un consumo específico similar al estándar internacional. Mientras en el horno 612 se observan un potencial de ahorro de energía térmica del 33,57%, que se puede atribuir a la incorrecta operación de los hornos o retrasos en la línea de producción que ocasionan el sobrecalentamiento del material, desperdiciando energía.

El horno 6 de Propulsora S. A a diferencia de los hornos de Alumina S. A, emplea para la fundición chatarra vieja, lo cual ocasiona un incremento en el consumo de combustible. De acuerdo al reporte de la Comisión Europea el consumo específico para la fundición de chatarra vieja en hornos reverberos es de 3,8 GJ/t, usado como referente para la comparación con el consumo térmico específico calculado para el horno de Propulsora S. A, ver Figura 5.

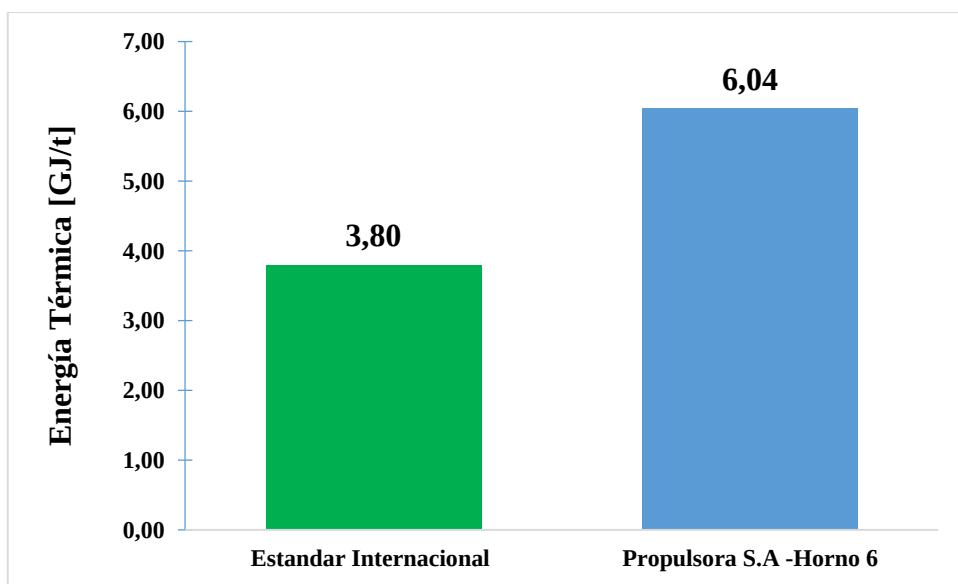


Figura 5. Consumo específico térmico en hornos de fundición de aluminio a partir de chatarra vieja en Propulsora S.A.

De acuerdo a la Figura 5, el potencial de ahorro de energía térmica en Propulsora S. A es del 58,91% respecto al estándar internacional. Esto demuestra un desfase significativo respecto al estado del arte internacional.

En el balance de energía se cuantificaron las entradas y salidas del volumen de control de acuerdo a las propiedades de los compuestos consultadas, y la metodología de cálculo mostrada en la norma internacional estándar ISO 13579-1 (International Standart Organization, 2013). Los valores del balance en cada uno de los equipos se reportan en la Tabla 7; se especifican las pérdidas de calor ocurridas durante el proceso de combustión debido a la combustión incompleta que ocasionan la

formación de monóxido de carbono, calor sensible en los gases de la combustión, y las pérdidas de energía por paredes.

De la Figura 6 a la Figura 9 se muestra el diagrama de Sankey de los hornos de fundición de aluminio diagnosticados en la región del Valle del Cauca y Cauca. En ellos se observa que la eficiencia de los hornos reverberos convencionales se encuentra en un rango del 19,19% al 36,00%. Mientras, los estudios internacionales reportan que la eficiencia de los hornos reverberos convencionales está entre el 20 al 25% (U.S. Department of Energy -Energy Efficiency and Renewable Energy & ITP Metal Casting, 2005). En estas figuras también se observa que la principal fuente de pérdidas de energía es el calor sensible en los gases de combustión en un rango del 35,85% al 48,43%, debido a las altas temperaturas con la cual salen los gases de combustión, 648,54°C a 1.095,80°C. En el caso del horno de oxidación (horno 1070) presenta una eficiencia del 71,68%, debido a que genera un volumen menor de gases al emplear oxígeno en lugar de aire; de esta manera las pérdidas de energía por calor sensible en los gases de combustión son del 8,31%.

Las pérdidas de energía no cuantificadas están asociadas a la apertura de las compuertas para el cargue de la materia prima, las cuales se tienen en cuenta en el desbalance de energía, donde también se incluye el nivel de precisión y errores durante la fase de medición.

Tabla 7. Balance de energía de los hornos de fundición de Aluminio.

EQUIPO/EMPRESA		H610-Alumina S. A		H612-Alumina S. A		H1070-Alumina S. A		H6-Propulsora S. A	
Descripción		Energía (kW/t)	Porcentaje (%)	Energía (kW/t)	Porcentaje (%)	Energía (kW/t)	Porcentaje (%)	Energía (kW/t)	Porcentaje (%)
Entrada	Energía aportada por el gas natural	682,67		927,57		273,91		1677,34	
	Pérdidas por paredes	56,09	8,22%	74,80	8,06%	23,50	8,58%	81,81	4,88%
Salidas	Pérdidas de calor por radiación	37,00	5,42%	42,75	4,61%	10,83	3,95%	55,65	3,32%
	Pérdidas de calor por convección	19,09	2,80%	32,06	3,46%	12,67	4,63%	26,15	1,56%
	Pérdidas en gases de chimenea	338,36	49,56%	511,92	55,19%	54,09	19,75%	1249,27	74,48%
	Calor latente de vaporización del agua	86,86	12,72%	118,56	12,78%	31,33	11,44%	436,84	26,04%
	Pérdidas por inquemados (CO)	6,74	0,99%	11,90	1,28%	0,00	0,00%	0,05	0,00%
	Calor sensible gases de combustión	244,76	35,85%	381,46	41,13%	22,76	8,31%	812,38	48,43%
	Calor de proceso	245,74	36,00%	246,02	26,52%	196,33	71,68%	321,92	19,19%
	TOTAL	640,19	93,78%	832,74	89,78%	273,91	100,00%	1652,99	98,55%
DESBALANCE		42,48	6,22%	94,82	10,22%			24,35	1,45%

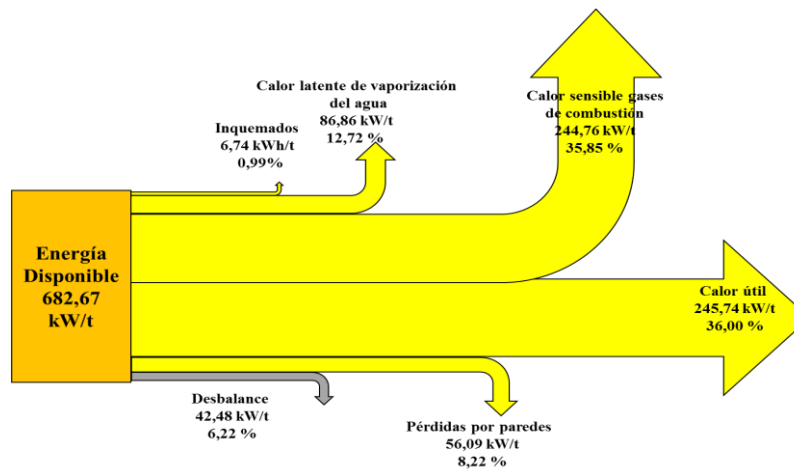


Figura 6. Diagrama Sankey del horno 610 –Alúmina s. A

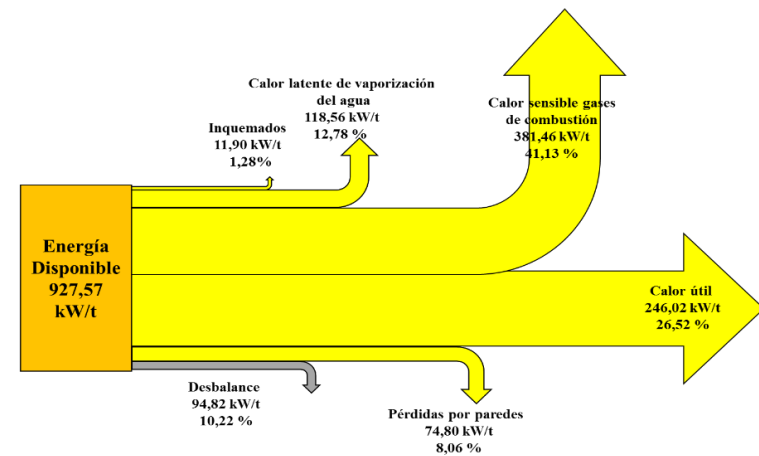


Figura 8. Diagrama Sankey del horno 612–Alúmina S. A

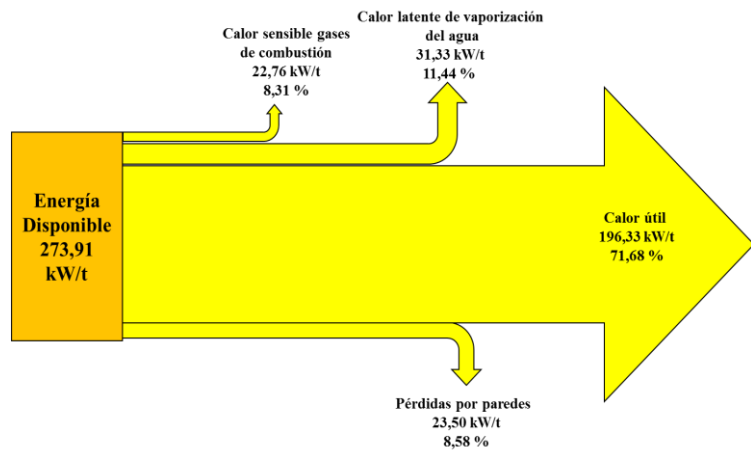


Figura 7.Diagrama Sankey del horno 1070 –Alúmina s.A

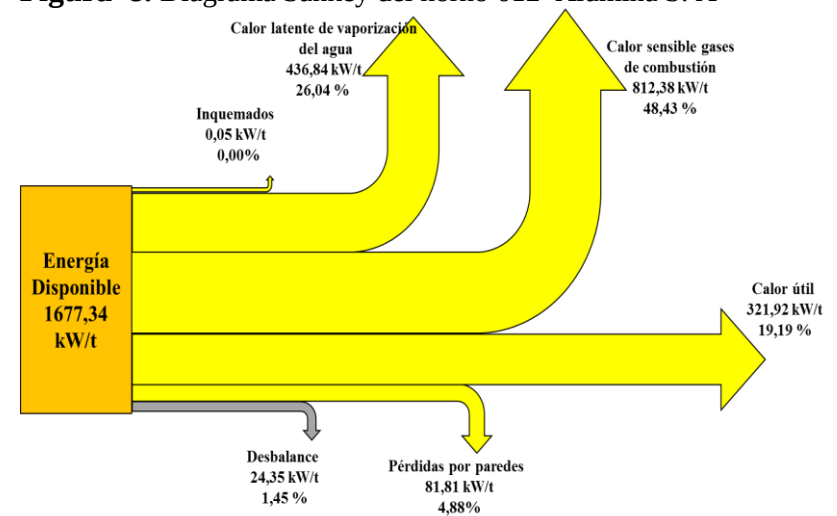


Figura 9. Diagrama Sankey del horno 6–Propulsora S.A

6.3.2. Calentamiento de palanquilla.

El esquema general de los hornos de calentamiento de palanquilla donde se realizó el diagnóstico energético se muestra en la Figura 10. El economizador hace referencia a un intercambiador de calor para la recuperación de energía de los gases de combustión. El área delineada corresponde al volumen de control.

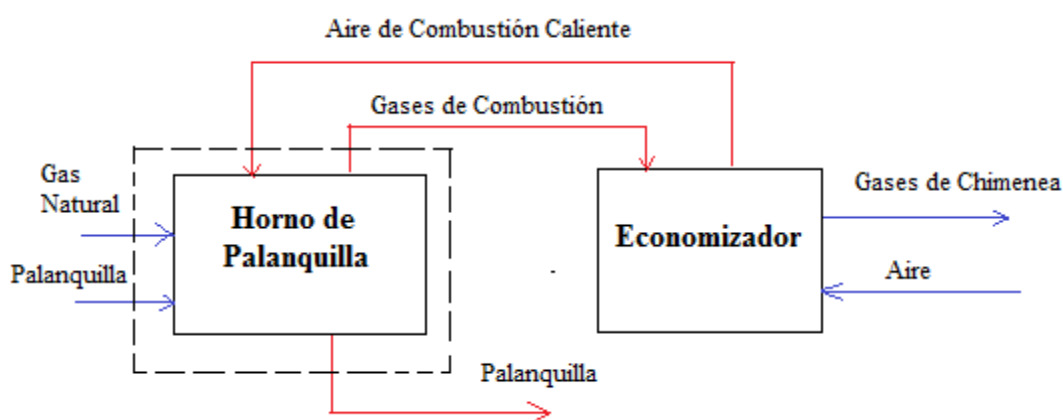


Figura 10. Volumen de control para el balance de materia y energía en hornos de calentamiento de palanquilla.

A continuación se presentan los resultados de las mediciones, balances de materia y energía al sector de fundiciones de metales ferrosos, en el proceso de calentamiento de palanquilla.

6.3.2.1. Gases de combustión

Los resultados del análisis de gases de combustión en los hornos de calentamiento de palanquilla en Sidoc S. A y Gerdau Diaco S. A –planta Yumbo se muestran en la Tabla 8. Debido a que los hornos poseen sistemas de recuperación de calor de los

gases de combustión, el análisis de los gases de combustión es realizado antes del intercambiador para la recuperación de calor. El análisis se complementa con la medición de la temperatura de salida de los gases después del intercambiador. Los gases de combustión medidos son el monóxido de carbono, oxígeno, dióxido de azufre y monóxido de nitrógeno en base seca, puesto que son medidas realizadas por los sensores electroquímicos del equipo.

Tabla 8. Composición y temperatura de los gases de combustión en los hornos de Sidoc S. A y Gerdau Diaco S. A

COMPUESTO	Sidoc S. A	Diaco S. A
	Horno #2	Horno Bendotti
Oxígeno-O ₂ (%)	9,10	8,29
Monóxido de carbono-CO(ppm)	1,70	56,22
Monóxido de nitrógeno NO(ppm)	65,20	64,88
Dióxido de azufre-SO ₂ (ppm)	0,90	3,70
Temperatura a la entrada del economizador [°C]	581,30	670,23
Temperatura a la salida del economizador [°C]	143,60	366,88

De acuerdo a los resultados del análisis de gases de combustión se evidencia que hay un nivel bajo de combustión incompleta, porque las emisiones de monóxido de carbono están entre 1,70 ppm a 56,22 ppm. La concentración de oxígeno en los gases está por encima del rango adecuado en un proceso de combustión con gas natural; el cual corresponde entre el 2-7 % de oxígeno(Wu et al., 2012). Aunque en la sección siguiente se evalúa la relación aire-combustible estequiométrica y real, con lo cual se evalúa los porcentajes de exceso de aire.

En la medición de temperatura de los gases de combustión al ingresar y al salir del intercambiador de calor, se evidencia un gradiente de temperatura entre 300°C-400°C, disminuyendo la pérdida de energía en gases de combustión e incrementando de esta manera la eficiencia del proceso. La temperatura de salida de los gases del horno #2 de Sidoc S. A es 143,60°C debido a la dilución que se realiza en los gases de combustión con aire para evitar el deterioro del material empleado para la construcción del intercambiador.

6.3.2.2. Exceso de aire

El análisis de los gases de combustión al ingresar al intercambiador de calor, la composición del gas natural suministrada por la empresa proveedora, Gases de Occidente S. A, son los insumos necesarios para evaluar la relación aire-combustible estequiométrica, y la relación aire-combustible real. Con estas relaciones se calculó el porcentaje de exceso de aire. Los valores de estos parámetros se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Relación aire-combustible molar en los hornos de Sidoc S. A y Gerdau Diaco S. A –planta Yumbo.

Empresa	Equipo Diagnosticado	A/C Estequiométrica	A/C Real	% Exceso de aire
Sidoc S. A	Horno #2	10,73	18,13	68,88
Diaco S. A	Horno Bendotti	10,74	24,87	131,48

La relación aire-combustible estequiométrica en un proceso de combustión con gas natural es de 10,73-10,74, moles de aire por mol de combustible. La relación aire-combustible real en el horno #2 de Sidoc S. A está en 18,13 moles de aire por mol de

combustible, con un exceso de aire del 68,88%. En el horno de Gerdau Diaco S. A, la relación aire combustible es de 24,87 moles de aire por mol de combustible, con un exceso de aire de 131,48%. Mientras, el exceso de aire recomendada en un proceso de combustión con gas natural es entre el 10%-30%.

El horno Bendotti de Gerdau Diaco S. A, tiene un sistema de control del flujo de aire que ingresa a cada una de las zonas de calentamiento, con la respectiva medida del flujo de gas natural. Sin embargo, el sistema de control no concuerda con el cálculo realizado del exceso de aire en el horno. Por lo cual es necesario verificar la calibración del sistema de control.

6.3.2.3. Balance de masa y energía

El balance de masa de la reacción de combustión del gas natural durante el proceso de calentamiento de palanquilla, se muestra en el Anexo 5. Se realiza el balance de energía en los hornos, en función del poder calorífico superior del gas natural. En la Figura 11 se muestra el consumo específico térmico para el calentamiento de palanquilla en dos empresas de la región Sidoc S. A y Gerdau Diaco S.A. El consumo específico de estas empresas se compara con el reporte del consumo específico térmico de hornos con recuperadores de calor, quemadores de bajo NO_x , y sistemas de control para administrar la velocidad de combustión, el cual se encuentra en 1,16 GJ/ tonelada (U.S. Department of Energy Office of Industrial Technologies, 2000).

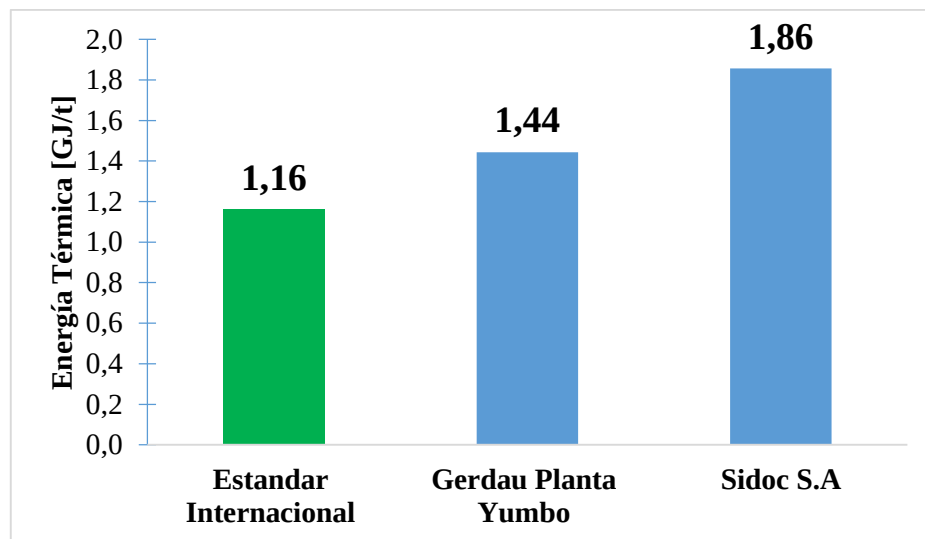


Figura 11. Consumo específico térmico para el calentamiento de palanquilla.

En Sidoc S. A se observa un potencial de ahorro de energía térmica al comparar con el estándar internacional del 60%. Mientras el Gerdau Diaco el potencial de ahorro estimado es del 24,34%. En las secciones siguientes se identifica el potencial de ahorro real de acuerdo a los balances de materia y energía en las empresas

El balance de energía para el calentamiento de palanquilla se reporta en la tabla 10, el volumen de control empleado se mostró en la Figura 10. En el balance se especifican las pérdidas de calor ocurridas durante el proceso de combustión debido a la combustión incompleta que ocasionan la formación de monóxido de carbono, calor sensible en los gases de la combustión, y las pérdidas de energía por paredes.

En la Figura 12 y la Figura 13 se muestra en diagrama de Sankey de los hornos de calentamiento de palanquilla diagnosticados en la región del Valle del Cauca. En ellos se observa que la eficiencia de los hornos de calentamiento de palanquilla esta entre el 32,85% al 46,00%. La principal fuente de pérdida de energía es el calor sensible en los gases de combustión; y por ello estos hornos tienen instalados sistemas de recuperación de calor por medio de intercambiadores de calor que calientan el aire que ingresa al proceso de combustión. La eficiencia del proceso del

calentamiento de palanquilla al tener en cuenta el calor recuperado en el horno Bendotti de Gerdau Diaco S. A es de 84,44%, mientras la eficiencia del horno #2 de Sidoc S. A al incluir la recuperación de calor es del 56,30%.

Tabla 10. Balance de energía de los hornos de calentamiento de palanquilla.

Empresa/ Equipo		Horno #2 -Sidoc S. A		Horno Bendotti-Gerdau Diaco	
	Descripción	Energía (kW/t)	Porcentaje (%)	Energía (kW/t)	Porcentaje (%)
Entrada	Energía aportada por el gas natural	515,55	85,00%	400,67	79,19%
	Calor sensible aire precalentado	91,01	15,00%	105,29	20,81%
	Pérdidas por paredes	41,87	6,90%	5,49	1,09%
	Pérdidas de calor por radiación	32,88	5,42%	3,99	0,79%
	Pérdidas de calor por convección	8,99	1,48%	1,51	0,30%
	Pérdidas en gases de chimenea	309,47	51,02%	239,73	47,38%
Salidas	Calor sensible gases de combustión	230,14	37,94%	221,48	43,77%
	Calor latente de vaporización del agua	79,33	13,08%	17,97	3,55%
	Pérdidas por inquemados (CO)	0,01	0,00%	0,28	0,06%
	Calor útil	199,24	32,85%	232,72	46,00%
	TOTAL	550,58	90,77%	477,95	94,46%
	DESBALANCE	55,98	9,23%	28,02	5,54%

Aunque las empresas intervenidas han implementado intercambiadores para la recuperación de calor de los gases de combustión, en el proceso de calentamiento de palanquilla; la temperatura de salida de los gases de combustión continúa siendo alta, y por ello se alcanzan niveles considerables de pérdida de energía. En el calentamiento de palanquilla la temperatura de salida de los gases de combustión del horno está entre 670,23°C -581,30°C, y se logran recuperar con el aire de combustión

un gradiente de temperatura entre 300°C-400°C. Es decir, que la temperatura de salida de los gases se encuentra entre 143,60°C y 366,88°C.

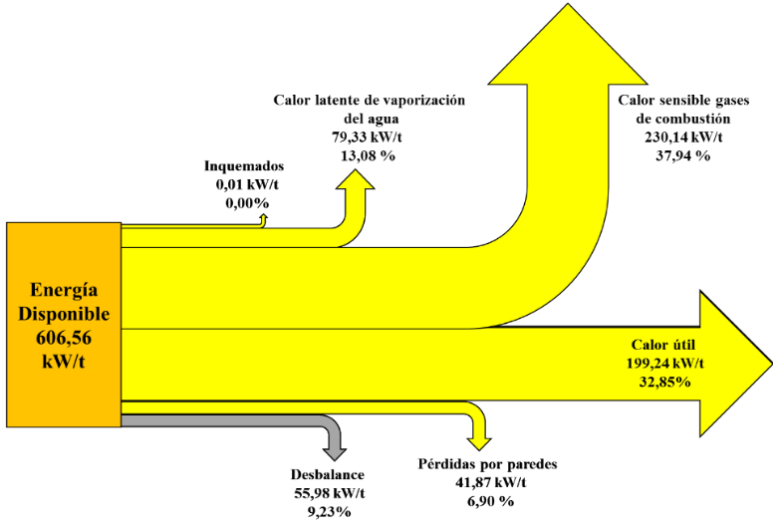


Figura 12. Diagrama Sankey del horno #2 -Sidoc S. A (sin tener en cuenta la recuperación de calor)

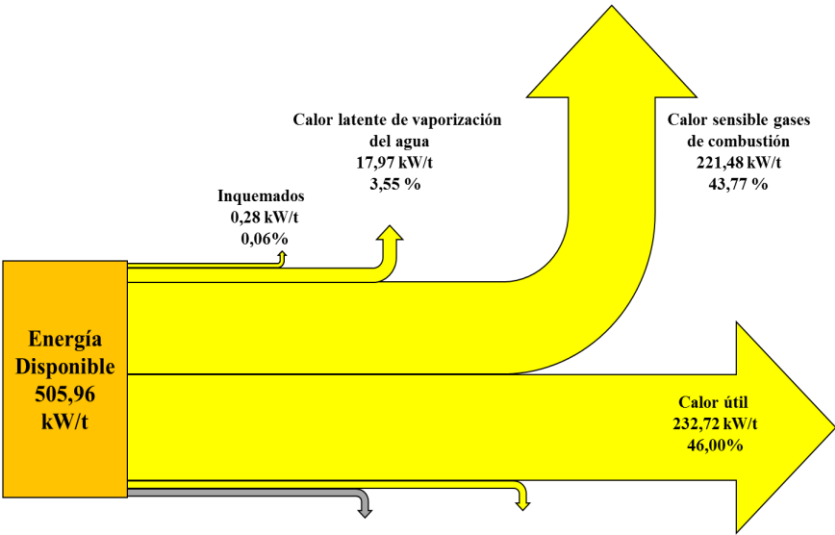


Figura 13. Diagrama Sankey del horno Bendotti –Gerdau Diaco S. A (sin tener en cuenta la recuperación de calor)

6.3.3. Tratamientos térmicos.

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones, balances de materia y energía en un tratamiento térmico de revenido realizado a piezas después de su formación con acero en la empresa Fundiciones Universo S.A.

6.3.3.1. Gases de combustión

Se presenta en la Tabla 11 los resultados de la temperatura y la composición volumétrica de los gases de combustión de los hornos, los cuales fueron censados con el analizador de gases portátil. Los gases de combustión medidos son el monóxido de carbono, oxígeno, dióxido de azufre y monóxido de nitrógeno en base seca, puesto que son medidas realizadas por los sensores electroquímicos del equipo.

Tabla 11. Composición y temperatura de los gases de combustión en el tratamiento térmico de revenido en Fundiciones Universo S.A.

Compuesto	Fundiciones Universo S. A
	Horno 1
Oxígeno-O ₂ (%)	15,79
Monóxido de carbono -(CO) ppm	34,24
Monóxido de nitrógeno (NO) ppm	17,28
Dióxido de azufre- (SO ₂) ppm	0,61
Temperatura gases de chimenea [°C]	579

Los resultados del análisis de gases de combustión muestran que hay un nivel muy bajo de combustión incompleta. Sin embargo, se observa una concentración de oxígeno en los gases de salida muy alto en 15,79%. La temperatura de salida de los

gases de combustión es 579°C, muy cercana a la temperatura del proceso de revenido en 650°C.

6.3.3.2. Exceso de aire

Con el análisis de gases de combustión se evalúa el exceso de aire en el proceso de combustión, y se compara con la relación aire-combustible estequiométrica. Los resultados de los parámetros se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Relación aire-combustible molar en el tratamiento térmico en Fundiciones Universo S.A.

Empresa	Equipo	A/C Estequiométrica	A/C Real	% Exceso de aire
Fundiciones Universo S. A	Horno #1	10,74	39,97	272,12%

La relación aire-combustible estequiométrica molar en el proceso de combustión con gas natural es de 10,74 moles de aire por mol de combustible. Al evaluar la relación aire-combustible real de acuerdo al análisis de gases de combustión, se encuentra en 39,97 moles de aire por mol de combustible; por lo tanto el exceso de aire en el horno es de 272,12%. El alto porcentaje de exceso de aire incrementa el volumen de los gases, ocasionando de esta forma pérdidas de energía debido al calentamiento de un volumen de gases mayor, además de otras ineficiencias que se ocasionan en el proceso de combustión.

6.3.3.3. Balance de masa y energía

El balance de masa de la reacción de combustión del gas natural durante el tratamiento térmico de revenido, se muestra en el Anexo 6. Se realiza el balance de energía del horno, en función del poder calorífico superior del gas natural. En la Figura 14 se muestra el consumo específico térmico para el tratamiento térmico en Fundiciones Universo S.A. El consumo específico se compara con el reporte del consumo específico térmico de un proceso de revenido en lotes, el cual se encuentra en 0,9 GJ/t. La mejor tecnología disponible para la realización de tratamientos térmicos son los procesos continuos, con un consumo específico térmico de 0,7 GJ/t (Worrell et al., 2008).

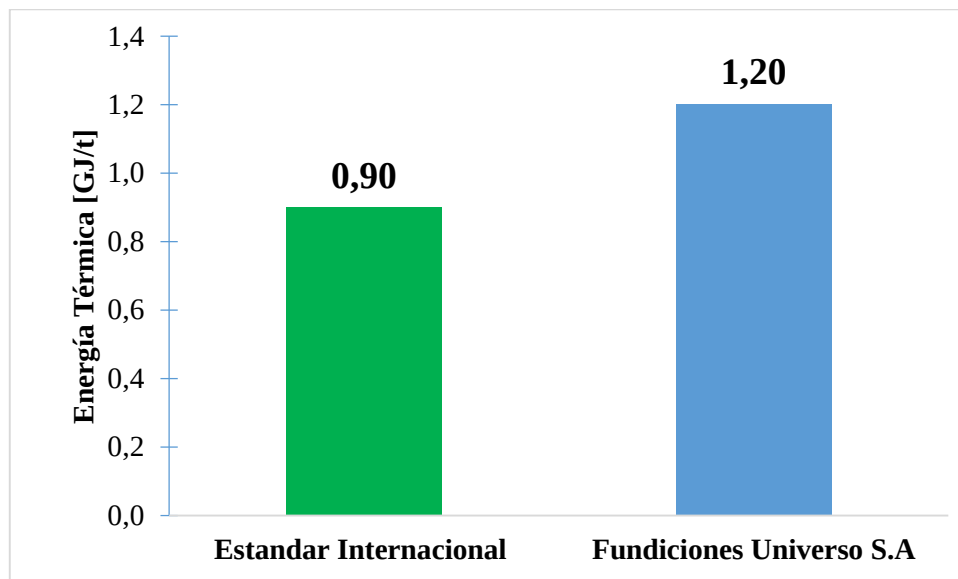


Figura 14. Consumo específico térmico en un horno de recocido.

En la comparación del consumo específico de la empresa con el estándar internacional se logra identificar un potencial de ahorro de 25,1%. Sin embargo con la evaluación de la eficiencia de los equipos, y los balances de materia y energía se identifica el potencial real de ahorro de energía en la empresa.

El balance de energía cuantifica las entradas y salidas del volumen de control de acuerdo a las propiedades de los compuestos consultadas, y la metodología de cálculo mostrada en la norma internacional estándar ISO 13579-1 (International Standart Organization, 2009). Los valores del balance en el equipo se reportan en la Tabla 13; se especifican las pérdidas de calor ocurridas durante el proceso de combustión debido a la combustión incompleta que ocasionan la formación de monóxido de carbono, calor sensible en los gases de la combustión, y las pérdidas de energía por paredes.

Tabla 13. Balance de energía durante el proceso de revenido en el horno 1 de Fundiciones Universo S.A.

EMPRESA/EQUIPO		Fundiciones Universo S. A Horno #1	
	Descripción	Energía (kW)	Porcentaje (%)
Entrada	Energía aportada por el gas natural	333,85	100,00%
	Pérdidas por paredes	4,23	1,27%
Salidas	Pérdidas de calor por radiación	2,82	0,85%
	Pérdidas de calor por convección	1,40	0,42%
	Pérdidas en gases de chimenea	242,39	72,60%
	Calor sensible gases de combustión	214,97	64,39%
	Calor latente de vaporización del agua	27,27	8,17%
	Pérdidas por inquemados (CO)	0,14	0,04%
	Calor útil	71,34	21,37%
	TOTAL	317,96	95,24%
DESBALANCE		15,89	4,76%

En el diagrama Sankey de la Figura 15 se observa la distribución de la energía aportada por la combustión del gas natural, se evidencia que el 21,37% de la energía que ingresa al sistema es empleada en el proceso de revenido, mientras el principal foco de pérdidas de energía es el calor sensible en los gases de combustión que corresponde al 64,39% de la energía ingresada. La causa de estas pérdidas de energía en los gases de combustión es la temperatura de salida de los gases en 579°C, y el porcentaje de exceso de aire que se presenta durante la combustión del gas natural, el cual se evaluó en 272,12%.

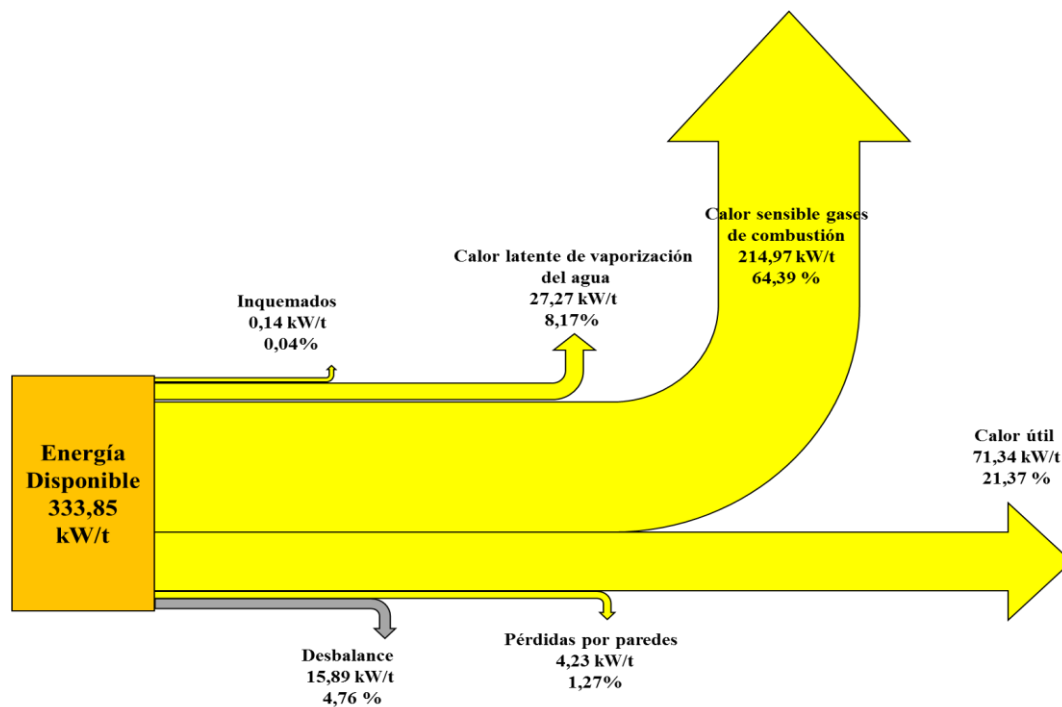


Figura 15. Diagrama Sankey del horno #1 en un tratamiento térmico de recocido en Fundiciones Universo S. A

Las pérdidas de energía que no fueron cuantificadas se incluyen en el desbalance con un valor del 4,76% de la energía que ingresa.

El referente internacional de la eficiencia energética en horno de tratamientos térmicos para materiales ferrosos indica una eficiencia del proceso del 30%, con una

pérdida de energía en gases de combustión entre el 50% y 60% (Schifo & Radia, 2004). Los sistemas de combustión empleados en estos hornos emplean aire ambiente como agente oxidante.

6.4. INDICADORES DEL CONSUMO DE ENERGÍA TÉRMICA

Los datos de consumo de gas natural y la producción fueron solicitados durante el año 2015, con dicha información se construye un indicador de intensidad energética térmica. La intensidad energética térmica se grafica versus la producción para cada uno de los equipos en las diferentes empresas participantes. A continuación se muestra la tendencia para cada uno de los subsectores.

6.4.1. Fundición de metales no ferrosos.

El análisis de la intensidad energética térmica en la fundición de metales no ferrosos como el aluminio, se presenta en la Figura 16. Un buen nivel de correlación entre el consumo específico de energía térmica (CE) y el nivel de producción (P) debe ser superior a 0,85, con una tendencia lineal decreciente que refleje la disminución del consumo específico al aumentar el nivel de producción, llegando hasta la capacidad de diseño. Sin embargo, en la Figura 16 para los hornos de fundición de aluminio en Alumina S. A se observan tendencias constantes, mientras en Propulsora S. A se presenta la tendencia decreciente; pero los niveles de correlación entre los consumos específicos y la producción son inferiores a 0,18, lo que no permite hacer proyecciones futuras sobre los potenciales de ahorro de energía a partir de una línea meta.

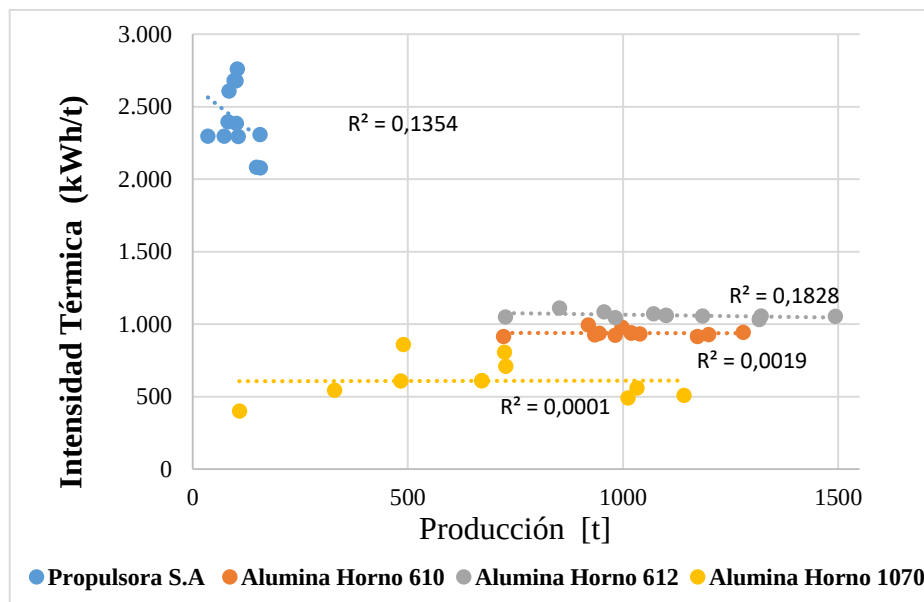


Figura 16. Intensidad térmica en la fundición de metales no ferrosos- Aluminio durante el año 2015.

Con los consumos específicos de gas natural y la producción mes a mes brindado por las empresas, se logró obtener valores aproximados de la eficiencia del proceso o calor útil mediante el método directo. Los resultados en el proceso de fundiciones de metales no ferrosos, exclusivo para el aluminio se muestran en la Figura 17.

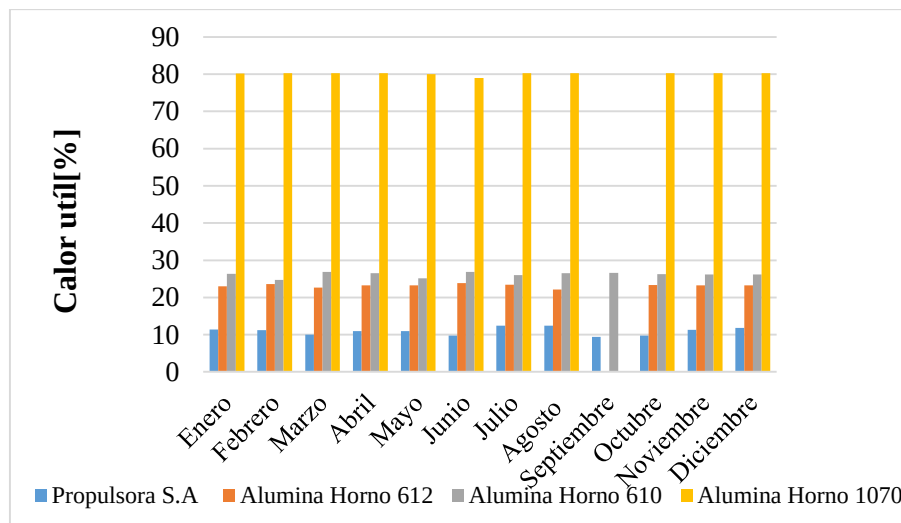


Figura 17. Eficiencia del proceso de fundición de metales no ferrosos- Aluminio durante el año 2015.

Los resultados de la eficiencia del proceso de fundición de aluminio durante el mes a mes del año 2015, muestran una eficiencia aproximada del 80,10% para el proceso de fundición de aluminio en un horno de oxidación, horno 1070 de Alúmina S.A. La eficiencia del proceso de fundición de aluminio en los hornos 610 y 612 está entre 26,18% y 23,18%, respectivamente. El proceso de menor eficiencia se encuentra en Propulsora S. A, con un 10,94%.

6.4.2. Calentamiento de palanquilla.

El análisis del consumo específico de energía térmica en el calentamiento de palanquilla se muestra en la Figura 18. De donde se calculó una correlación entre 0,17 y 0,53, para las dos empresas participantes Gerdau Diaco S. A y Sidoc S. A, respectivamente.

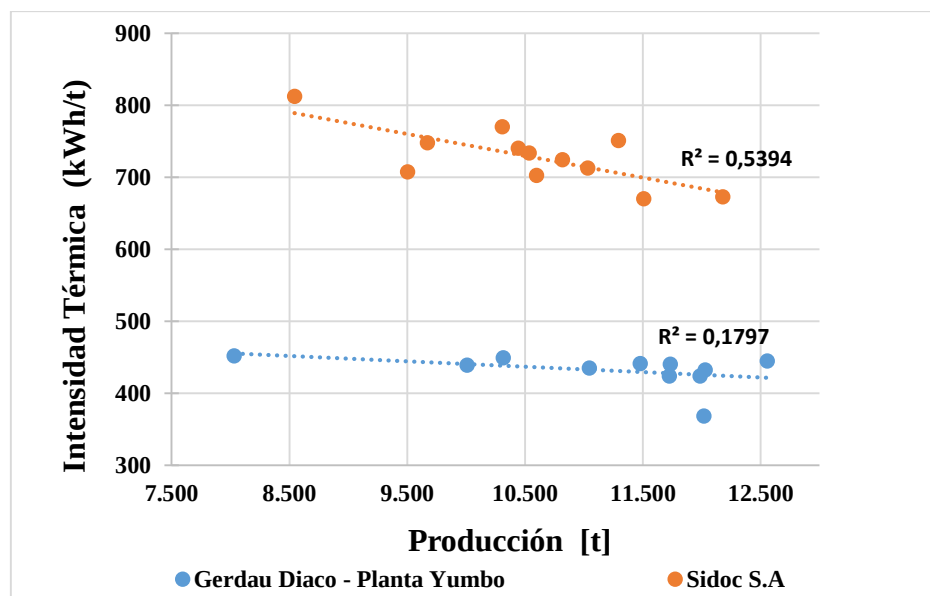


Figura 18. Intensidad térmica en el calentamiento de Palanquilla durante el año 2015

En la evaluación de la eficiencia del proceso de calentamiento de palanquilla por el método directo, que se muestra en la Figura 19, se observó una eficiencia del proceso aproximada del 54,04% en Gerdau Diaco S.A. Mientras, la eficiencia del proceso en Sidoc S. A se sostiene en un promedio del 27,41%. Esto sin tener en cuenta recuperación de calor de los gases de combustión.

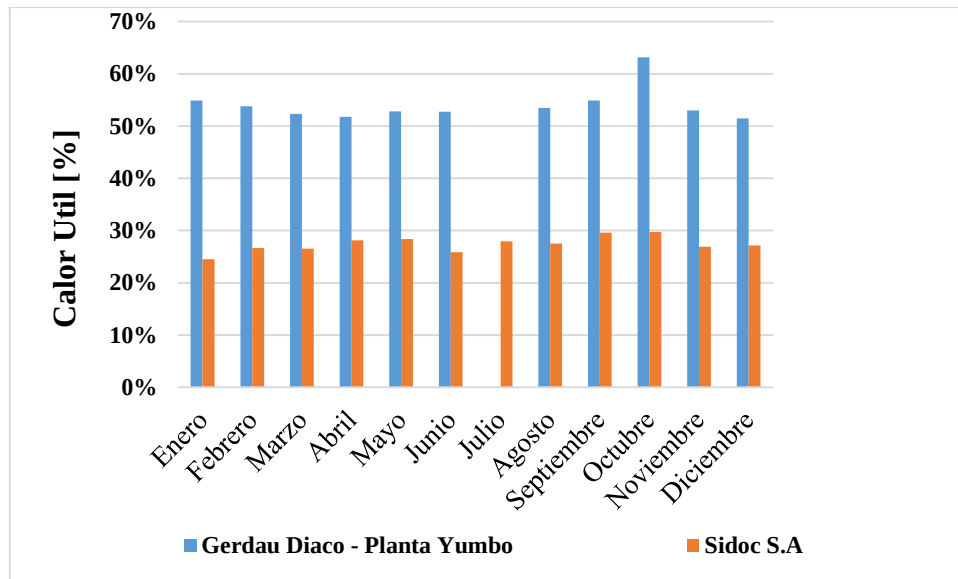


Figura 19. Eficiencia del proceso de fundición de metales ferrosos-Calentamiento de Palanquilla durante el año 2015.

6.4.3. Tratamientos térmicos

El consumo específico para el tratamiento térmico de revenido realizado en Fundiciones Universo S. A se muestra en la Figura 20, se observó que no existe una tendencia clara debido al nivel de correlación de 0,0009 entre los indicadores existentes.

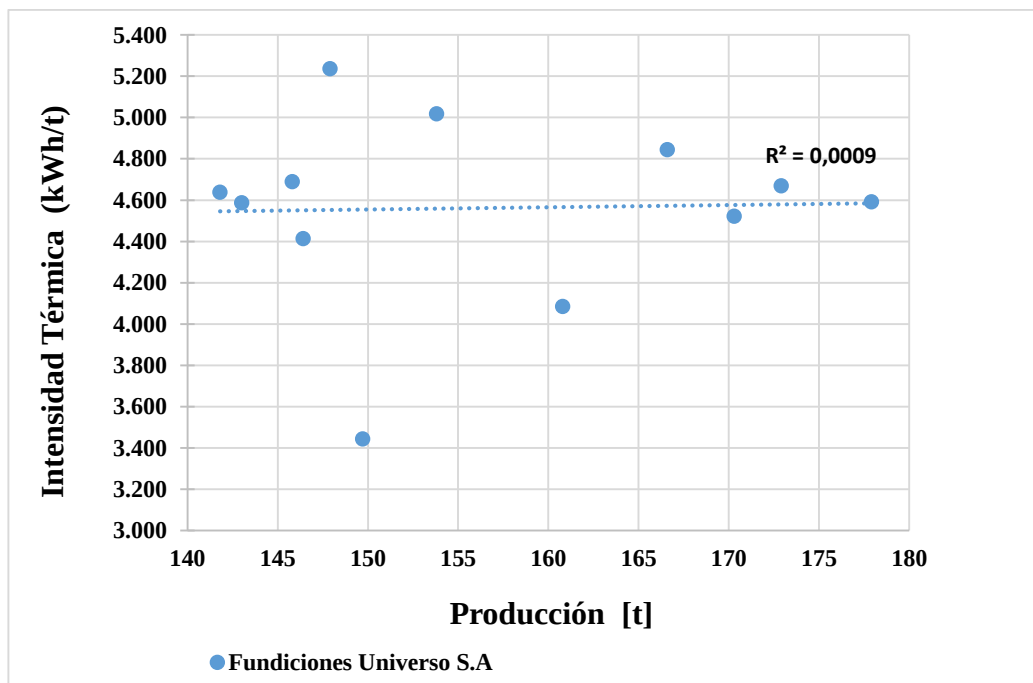


Figura 20. Intensidad térmica en el tratamiento térmico de metales ferrosos durante el año 2015.

El resultado del nivel de correlación entre la intensidad energética térmica y la producción se presenta porque en el área de tratamientos térmicos de la empresa no se ha establecido adecuadamente nivel de producción, debido a las diferentes líneas de producción con que cuenta la empresa. Y no tienen medidores del consumo de gas natural por equipo o por área. Las razones anteriormente mencionadas tampoco permitieron realizar la evaluación de la eficiencia del proceso por el método directo.

7. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPUESTAS DE MEJORA DE LA ENERGÍA TÉRMICA PARA EL SECTOR DE FUNDICIONES

Partiendo del diagnóstico de eficiencia energética se identifica cuál es la principal fuente de pérdida de energía, para postular las posibles propuestas de ahorro de energía térmica. Se tabula en la Tabla 14 las pérdidas de energía en cada uno de los equipos en las empresas participantes y se evalúa cuál es la más representativa.

Las pérdidas de energía por calor sensible en los gases de combustión son la principal fuente de pérdida de energía en los sistemas de fundición de aluminio, calentamiento de palanquilla y tratamientos térmicos; representando un porcentaje promedio de pérdidas de energía del 39,98%. En segunda posición se encuentran las pérdidas de energía en el calor latente de vaporización del agua, que corresponde a la pérdida de calor debido al agua que contiene el aire de combustión, la cual incrementa su temperatura hasta la temperatura de los gases; y la formación de vapor de agua durante la combustión del hidrógeno contenido en el combustible. Sin embargo, estas fuentes de pérdida de energía las contiene el flujo de gases de combustión, al igual que la energía perdida por inquemados (CO). Estas tres fuentes de pérdidas de energía, conforman el total de las pérdidas de energía en los gases de combustión con un porcentaje promedio del 54,22%, los cuales deben reducirse o aprovecharse a partir de las propuestas de ahorro.

Tabla 14. Pérdidas de energía en el subsector de fundiciones de metales ferrosos y no ferrosos.

Empresa/Equipo	Pérdidas por paredes		Calor latente de vaporización del agua		Pérdidas por inquemados (CO)		Calor sensible gases de combustión		Otras pérdidas	
	KW/t]	[%]	KW/t]	[%]	KW/t]	[%]	KW/t]	[%]	KW/t]	[%]
Alúmina S. A -H610	56,09	8,22	86,86	12,72	6,74	0,99	244,76	35,85	42,48	6,22
Alúmina S. A -H612	74,80	8,06	118,56	12,78	11,90	1,28	381,46	41,13	94,82	10,22
Alúmina S. A -H1070	23,50	8,58	31,33	11,44	0,00	0,00	22,76	8,31		0,00
Propulsora S. A -H6	81,81	4,88	436,84	26,04	0,05	0,00	812,38	48,43	24,35	1,45
Sidoc S. A -Horno #2	41,87	6,90	79,33	13,08	0,01	0,00	230,14	37,94	55,98	9,23
Gerdau Diaco S. A- Horno Bendotti	6,28	1,24	17,97	3,55	0,28	0,06	221,48	43,77	45,96	9,08
Fundiciones Universo S. A- Horno #1	4,23	1,27	27,27	8,17	0,14	0,04	214,97	64,39	15,89	4,76
TOTAL	288,57		798,16		19,11		2127,96		279,49	
PROMEDIO		5,59		12,54		0,34		39,98		5,85

*Con base al poder calorífico superior

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente las propuestas corresponden a medidas o tecnologías disponibles que puedan ser consideradas con el propósito de reducir el consumo de energía térmica, logrando procesos más eficientes y competitivos. Las propuestas consideradas fueron:

- Recuperación de calor de los gases de combustión para el calentamiento del aire de combustión.
- Control de la relación aire-combustible.
- Oxígeno enriquecido
- Implementación de sistemas de cogeneración
- Quemadores auto-recuperativos o auto-regenerativos.
- Quemadores flameless.
- Recuperación de calor en los gases de combustión para el precalentamiento de la materia prima

En los siguientes párrafos se describen cada una de estas propuestas.

7.1. RECUPERACIÓN DE CALOR DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN PARA EL CALENTAMIENTO DEL AIRE DE LA COMBUSTIÓN. (RCGCA)

El calor que contienen los gases de combustión se puede emplear para el precalentamiento del aire de la combustión, debido a que la temperatura promedio de salida de los gases en los diferentes procesos está en 654,81°C. En la implementación de estos sistemas de recuperación de calor el quemador debe emplear componentes resistentes a altas temperaturas y controles automáticos del sistema de combustión y la temperatura de proceso bajo la variación de la carga; teniendo en cuenta el

incremento en las emisiones de NO_x que se puede presentar (Schifo & Radia, 2004) (Remus, Roudier, Aguado Monsonet, & Sancho, 2013).

Los ahorros alcanzados en el consumo de combustible con el precalentamiento del aire, se evalúan en función de la temperatura de calentamiento, como se observa en la Figura 21.

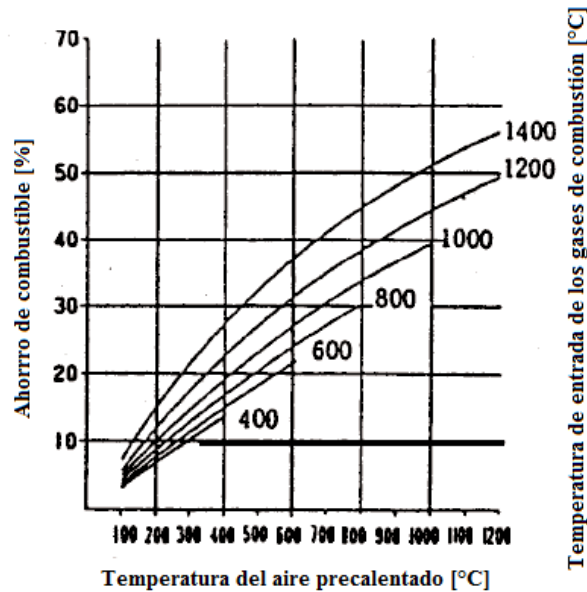


Figura 21. Ahorro de combustible en función de la temperatura del aire precalentado. Fuente: (Shires, 2006)

Un ejemplo del ahorro en el consumo de combustible con el precalentamiento del aire de combustión se observa en Gerdau Diaco S. A y Sidoc S. A, donde se calienta el aire en una temperatura entre 339°C y 390°C, y se logra un ahorro entre el 15%-20% en el consumo de gas natural. En la Figura 22 se muestra un esquema de un sistema para la recuperación de calor de los gases de combustión.

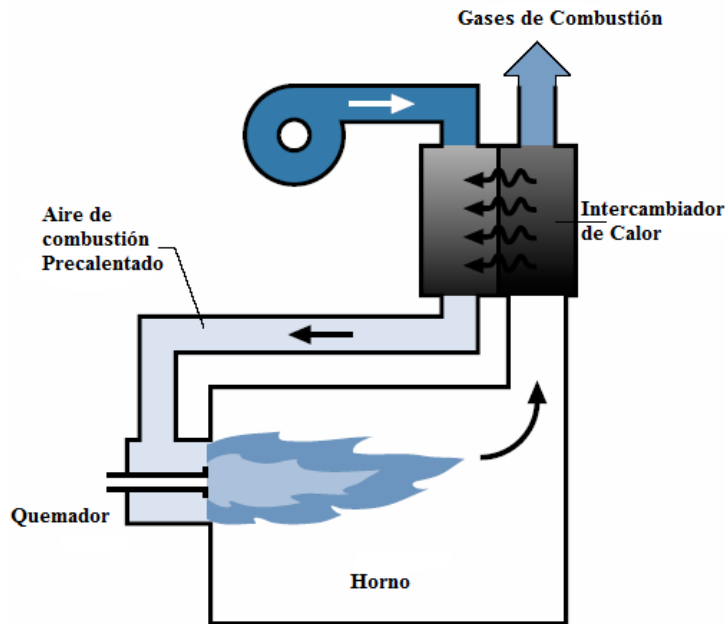


Figura 22. Esquema de un recuperador de calor para el calentamiento del aire de combustión. Fuente: (U.S. Department of Energy -Energy Efficiency and Renewable Energy & ITP Metal Casting, 2005)

7.2. CONTROL DE LA RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE (CRAC)

La relación aire-combustible durante los procesos de combustión diagnosticados se encontró generalmente por encima de los niveles recomendados, ocasionando la presencia de grandes volúmenes de aire en el sistema que inciden en las pérdidas de energía por calor sensible en los gases de la combustión y vaporización del agua. Los sistemas de control implementados deben relacionar los flujos de aire y combustible, mediante sensores del nivel del oxígeno en el hogar. Otra opción disponible es emplear variadores de velocidad en el ventilador del aire de combustión, de acuerdo a la variación de la carga con el tiempo.

Una causa de la falta de control sobre la relación aire combustible son las infiltraciones de aire a los equipos, evidenciado en hornos que con sistemas de

control implementados presentaron altos niveles de exceso de aire. Las infiltraciones de aire se presentan por pequeñas fisuras en los hornos, por donde ingresa aire frío que se calienta hasta la temperatura de salida de los gases. Por lo tanto, las acciones o medidas realizadas deben ser:

- Reparar el área de las fugas o el aislamiento del equipo.
- Mantener cerradas las puertas del equipo y mantener un sello hermético.
- Instalar un sistema de control de presión de aire en punto de mayor fuga, de tal forma que mantenga equilibrado ligeramente positiva la presión.
- Instalar un damper en la chimenea, de manera que se controle manualmente la presión en el horno, si el control automático no funciona.
- Instalar un manómetro para monitorear continuamente la presión en el horno en el nivel donde se presentan las mayores infiltraciones de aire, en el caso que no pueda ser sellado correctamente, o ajustar el damper manualmente para mantener el balance, sosteniendo la presión positiva.

7.3. ENRIQUECIMIENTO DEL AIRE DE COMBUSTIÓN CON OXÍGENO (EACOX)

Esta técnica pretende aumentar la concentración de oxígeno durante el proceso de combustión; de tal forma que se evita la presencia de nitrógeno en el proceso, disminuyendo el volumen de gases y las pérdidas de energía en ellos.

Un ejemplo de la aplicación de la oxicomcombustión es el horno de fundición de aluminio, horno 1070 de Alúmina S. A, donde se evidenció que el proceso logra una eficiencia del 71,68%; mientras los procesos convencionales tienen eficiencias entre el 19,19% al 36,00%.

7.4. IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR UN CICLO RANKINE ORGÁNICO (ORC)

Todas las plantas del sector de fundición de metales requieren para su operación energía eléctrica y energía térmica, convirtiéndose en buenos candidatos para la implementación de sistemas de cogeneración, conocido como Ciclo Rankine Orgánico (ORC). Los Ciclos Rankine Orgánico emplean el calor residual con temperaturas superiores a los 250°C. Sin embargo estos sistemas presentan la desventaja de que la eficiencia es del orden del 10% menor en relación a un turbogenerador de vapor. Aunque es importante resaltar que la fuente de energía es calor de desecho, por lo cual no se considera relevante estos valores bajos de eficiencia (Sánchez-Junco, 2012). La temperatura promedio de salida de los gases de combustión en los procesos evaluados fue de 654,81°C, evidenciando de esta manera el alto potencial para la generación de energía eléctrica a partir de un ciclo ORC.

En la Figura 23 se puede ver un esquema del Ciclo ORC acoplado a la salida de gases del horno, que luego de entregar su calor sensible en el evaporador, son expulsados al ambiente a una temperatura aproximada a 50°C. Posteriormente, se genera energía eléctrica que puede ser utilizada en los procesos de la planta o puede comercializarse a la red eléctrica.

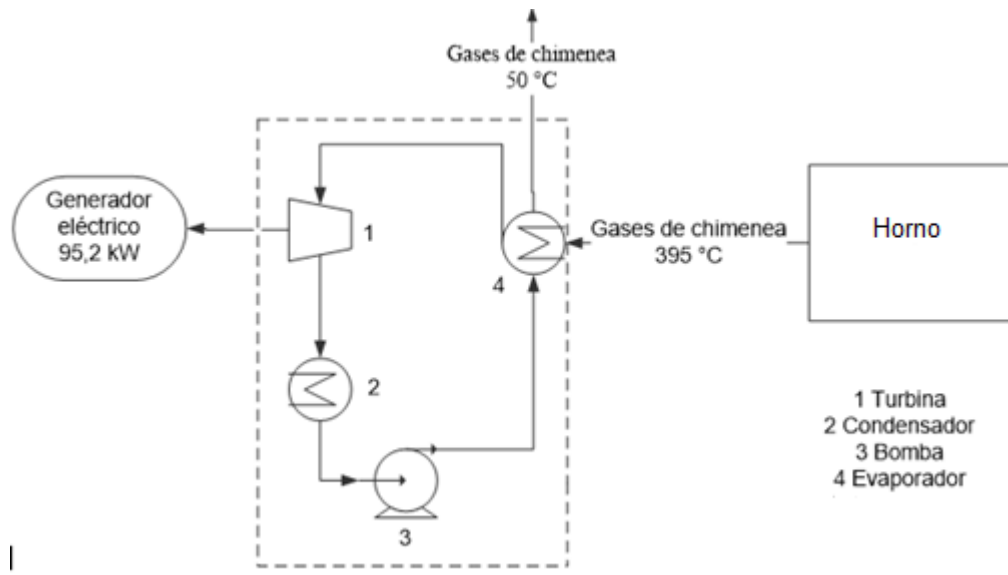


Figura 23. Esquema uso de ciclo ORC después del intercambiador de calor(Nimbalkar & Oak Ridge National Laboratory, 2015).

En la Figura 23 el evaporador (4) se emplea para precalentar y evaporar el fluido orgánico. El vapor orgánico se expande en la turbina (1). Posteriormente, el fluido orgánico en fase de vapor se condensa por medio de agua de refrigeración en (2). Y finalmente, el fluido orgánico es impulsado por medio de una bomba (3), completando de este modo la secuencia de operaciones en el circuito cerrado.

La implementación de sistemas de ciclo combinado genera beneficios ambientales, y mejora el funcionamiento de los equipos (Remus et al., 2013).

7.5. QUEMADORES AUTO-RECUPERATIVOS O AUTO-REGENERATIVOS (QAR)

Los quemadores con recuperación de calor integrada constituyen el método más eficiente para recuperar el calor sensible portado por los productos de combustión en

hornos industriales operando a altas temperaturas. Los quemadores auto-recuperativos cuentan con un intercambiador de calor gas-gas, que consiste generalmente en tubos o platos para transferir calor desde los gases de salida al aire de combustión, el cual se incorpora en el cuerpo del quemador. Estos quemadores cuentan con un sistema de eyección que permite la extracción de los gases a través del mismo quemador.

La aplicación de quemadores recuperativos puede reducir el consumo de energía. De acuerdo a los reportes de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos se logra una reducción en el consumo de combustible entre un 10% a 20% comparado con hornos sin recuperación de calor (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2012). Sin embargo, se debe evitar la instalación de esta tecnología en equipos con un mal aislamiento de las paredes e infiltraciones de aire frío del exterior, ya que se reduce la eficiencia de la tecnología.

La Figura 24 presenta un esquema de quemadores auto-regenerativos, los cuales cuentan con un lecho cerámico a través del cual se hacen pasar los productos de la combustión antes de enviarlos a la chimenea, con lo que la energía sensible portada por los gases se acumula en el lecho cerámico, luego de un período el sistema se conmuta haciéndose pasar por el lecho aire frío que extrae la energía acumulada en el lecho y la devuelve de nuevo al sistema con efectividades de recuperación de calor entre 70 y 85%, permitiendo obtener importantes ahorros de combustible dependiendo de la temperatura de operación del proceso y reducción de emisiones de CO₂ del 59.2%, (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. República de Colombia, 2012).

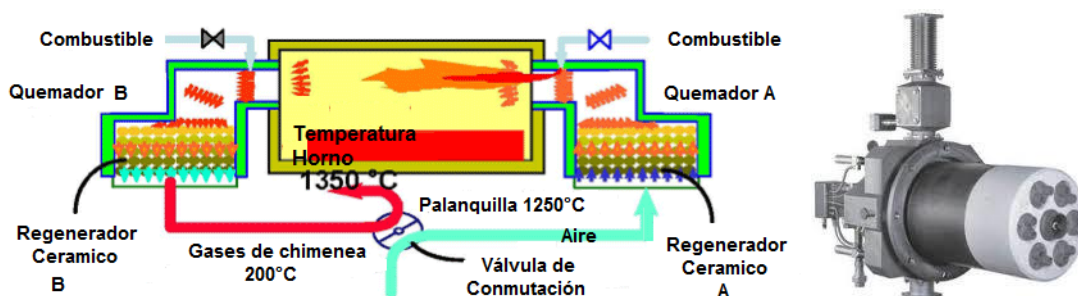


Figura 24. Quemadores auto-regenerativos

La aplicación potencial de los quemadores auto-recuperativos o auto-regenerativos se encuentra en los hornos de fundición de aluminio, donde se han desarrollado hornos reverberos con quemadores de esta tecnología. Aunque también es posible emplearlos en los hornos tipo empuje para el calentamiento de palanquilla, y en los hornos de solera móvil para realizar tratamientos térmicos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. República de Colombia, 2012).

7.6. QUEMADORES FLAMELESS (QF)

Los quemadores tipo flameless o quemadores sin llama, conocidos también como sistemas de combustión diluida, la inyección de aire de combustión y el combustible se hace de manera separada. La geometría del quemador y de la cámara de combustión, así como las altas velocidades de los flujos, crean grandes recirculaciones internas de los productos de combustión al quemador. Con la recirculación del flujo de gases se recupera el calor sensible que contienen, permitiendo la disminución de la pérdida de energía en ellos. La alta temperatura de estos productos ($> 600^{\circ}\text{C}$) se usa para iniciar y mantener este modo de combustión, en donde la llama no se puede ver y la reacción está distribuida en todo el volumen de la cámara

Los quemadores flameless oxígeno-combustible brindan una mayor eficiencia térmica, mayor nivel de flujo de calor, y reduce el consumo de combustible comparado a un sistema convencional de oxidación. Adicionalmente, se logra la disminución de las emisiones de NO_x y mejora la uniformidad térmica.

ArcelorMittal, el principal productor siderúrgico y metalúrgico mundial, implementó los quemadores flameless de oxidación en los hornos de recalentamiento de acero, logrando un ahorro del 60% en el consumo de combustible comparado con la operación convencional con aire. Se redujo en un 92% las emisiones de NO_x y las emisiones anuales de CO₂ en un 60% (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2012).

7.7. RECUPERACIÓN DE CALOR EN LOS GASES DE COMBUSTIÓN PARA EL PRECALENTAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA (RCGCM)

El calor de los gases de combustión es empleado para calentamiento de la materia prima, que tal forma que se disminuye el ingreso de energía al horno, se realiza los procesos de fundición más rápido y se incrementa la capacidad de fundición (Lazzarin & Noro, 2015). Esta alternativa se ha dado a conocer para aplicación en plantas de fundición de metales no ferrosos como el aluminio, y ferrosos como hierro y acero. No se ha aplicado a procesos de calentamiento de palanquilla o tratamientos térmicos debido a las condiciones técnicas de estos procesos.

Entre las empresas participantes del proyecto, dos empresas (2) están dedicadas a la fundición de aluminio y dos (2) a los procesos de calentamiento de palanquilla. Aunque estas dos últimas empresas también realizan el proceso de fundición de

acero, y podría pensarse en la recuperación del calor del proceso de calentamiento de palanquilla, para el precaliente de la chatarra ferrosa para la elaboración de acero; las características de la planta afectan la factibilidad de calentamiento de la carga debido a la distribución de la misma y la localización del sistema de salida de los gases de combustión y el ingreso de la carga a los hornos de arco eléctrico.

El precalentamiento de la materia prima es una alternativa empleada desde hace varios años en países con un costo de la energía eléctrica alta, como es Japón (Remus et al., 2013). En la planta de North Star Steel (Iowa, Estados Unidos) , se precalienta la carga en un rango de temperatura moderada de 450°C a 550°C a partir de los gases de combustión del mismo proceso de fundición de acero, resultando un ahorro de costos del 32% aproximadamente (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2012), equivalente a un ahorro de energía entre 70-100 kWh/t(Remus et al., 2013).

En el proceso de fundición de aluminio la recuperación de calor para el precalentamiento de la materia prima se conoce como una mejora tecnológica en hornos Stack (horno Pila), que consiste en un horno reverbero con un sistema de precalentamiento de la carga. El consumo específico de estos hornos está en 2,00 GJ/t (Schifo & Radia, 2004), mientras el consumo específico en los procesos convencionales se encuentra entre 2,46 GJ/t -6,04 GJ/t.

8. EVALUACIÓN DE LAS PROPUESTAS DE MEJORA DE LA ENERGÍA TÉRMICA PARA EL SECTOR DE FUNDICIONES

En esta sección se muestra la evaluación técnica y financiera de las propuestas mencionadas anteriormente. Se evaluó la energía ahorrada, costo de la energía térmica ahorrada y potenciales costos de inversión de cada una de las propuestas, las cuales surgen a partir de la evaluación de las pérdidas de energía térmica en los sistemas intervenidos.

8.1. RECUPERACIÓN DE CALOR DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN PARA EL CALENTAMIENTO DEL AIRE DE LA COMBUSTIÓN (RCGCA).

En los diferentes procesos del sector de fundición de metales que participan de este proyecto se evaluaron los potenciales ahorros de energía térmica al implementar un sistema de recuperación de calor para el calentamiento de los gases de combustión. La evaluación de los potenciales de ahorro se realizó a partir de los balances de masa y energía, donde se asume que la temperatura de calentamiento del aire de la combustión es de 400°C. La evaluación de los potenciales de ahorro no se realizó en las empresas Gerdau Diaco S. A, y Sidoc S. A debido a que estas empresas ya cuentan con sistemas de recuperación de calor a partir de los gases de combustión. Para el caso del horno 1070 de Alumina S. A no se realiza la evaluación porque opera con oxígeno como comburente.

La evaluación de los potenciales de ahorro se inicia con el cálculo de la temperatura de salida de los gases de combustión por medio de un balance de energía en el

intercambiador como se muestra en la ecuación 10, de donde se deduce la ecuación 12 y se despeja la temperatura de salida de los gases al implementar el sistema de recuperación de calor.

$$Q_{Gases} = \eta * Q_{Aire} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\sum_{i=0}^i m_i C_{P,i} (T_{sal,g} - T_{ent,g}) = \eta \sum_{j=0}^j m_j C_{P,j} (T_{sal,a} - T_{ent,a}) \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\sum_{i=0}^i m_i C_{P,i} (T_{sal,g} - T_{ent,g}) = \eta \sum_{j=0}^j m_j C_{P,j} (400,00^{\circ}C - 34,53^{\circ}C) \quad \text{Ecuación 12}$$

Dónde:

m_i Masa del componente i ó j en el flujo de gases de combustión o el aire.

$C_{p,i,j}$ Capacidad calorífica del componente i, j en el flujo de gases de combustión o el aire

$T_{sal,g}$ Temperatura de salida de los gases después del sistema de RCGCA.

$T_{ent,g}$ Temperatura de salida de los gases después del sistema de RCGCA.

η Eficiencia del sistema de RCGCA, la cual se asume en 85%.

Evaluada la temperatura de salida de los gases después del sistema de recuperación de calor, se sostienen las condiciones del sistema en los cálculos realizados de las otras fuentes de pérdida de energía, y se evalúa la energía requerida en el equipo al implementar la RCGCA; la diferencia entre la energía requerida en el proceso tradicional y la requerida al implementar la RCGCA corresponde a la energía ahorrada.

El área del intercambiador de calor para la recuperación de calor, se calculó con la ecuación 13; los resultados son insumo necesario para calcular los costos de inversión.

$$Q_{Gases} = UA LMTD \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

$U=$ Coeficiente global de transferencia de calor.

A= Área de transferencia requerida.

LMTD= Diferencia media logarítmica de temperaturas.

Se evaluó la temperatura de salida de los gases de combustión después del sistema de recuperación de calor, ahorro en el consumo de gas natural en unidades de volumen [m^3/t], ahorro en el consumo de gas natural en unidades de energía [KWh/t], eficiencia del proceso, consumo de gas natural al implementar sistemas de recuperación de calor. Finalmente se evaluó el ahorro económico; donde el costo del gas natural se tomó como el costo promedio unitario por consumo de gas natural destinado a usuarios regulados durante el año 2016 y corresponde a \$1.371,24 COP/ m^3 . El usuario no regulado entre las empresas mencionadas es Alumina S.A, sin embargo no se conoce el precio del gas natural en su contratación con la empresa proveedora, por lo tanto puede existir un sobrestimación de los potenciales de ahorro. Los resultados se muestran en la Tabla 15.

Con la implementación del sistema de recuperación de calor de los gases de combustión se logra incrementar la eficiencia del proceso de fundición de aluminio en un rango del 37,47% al 57,60%, comparado al proceso convencional con el cual se logra un rango de eficiencias entre el 19,19% al 36,00%; lo que equivale a un incremento de la eficiencia en una relación de 1,34 a 2,69 veces la eficiencia de los procesos de fundición de aluminio en los cuales se emplea aire a temperatura ambiente. Se logra de esta manera ahorros en el consumo de gas natural de 18,04 m^3/t a 96,77 m^3/t de aluminio fundido, lo que corresponde a un porcentaje de ahorro respecto al consumo total por tonelada de material del 31,26% a 68,25%. En términos económicos una compañía lograría un ahorro al implementar la alternativa propuesta de \$24.739 COP/t de aluminio, hasta \$132.691 COP/t, correspondientes a un ahorro anual superior a los cuarenta y ocho millones de pesos en el caso de Fundiciones Universo S. A, hasta los cuatrocientos cincuenta y tres millones de pesos para el caso de Alumina S.A.

Tabla 15. Potenciales de ahorro de energía térmica con el calentamiento del aire de combustión.

Empresa	Temp. Gases antes Recuperador [°C]	Temp. Gases después Recuperador [°C]	Eficiencia Proceso	Consumo Gas Natural Aire Caliente [m³/h]	Ahorro Gas Natural			Potencial Ahorro Económico [\$/t]
					[m³/t]	[%]*	[KWh/t]	
Alumina S.A-H610	997,50	677,06	48,44	112,12	18,04	31,26	213,44	24.739
Alumina S.A - H612	1095,80	770,64	37,47	118,80	27,34	34,88	323,50	37.496
Alumina S.A - H1070	752,40							
Propulsora S.A-H6 Fundiciones	648,54	284,22	42,74	21,60	96,77	68,25	1144,80	132.691
Universo S.A - Horno 1	579,00	235,66	57,60	3,15	18,68	66,21	221,06	25.612

*Corresponde al porcentaje de ahorro de combustible respecto al consumo total por tonelada de material.

Emplear los gases de combustión para el calentamiento del aire implica tener en cuenta que los gases generados sean bastante limpios, en lo que se refiere a NO_x y SO_2 ; y que la temperatura de expulsión de los gases sea superior a la temperatura de condensación, con el fin de evitar la corrosión del material seleccionado. El siguiente paso, para determinar si la alternativa puede ser considerada, consiste en detalles contables donde se debe estimar los potenciales costos de inversión de la tecnología.

El costo de la inversión para la implementación de un intercambiador para la recuperación del calor de los gases de combustión se puede estimar con base al estudio realizado en una empresa de ingeniería Colombiana, donde se obtuvo un costo inversión de \$1.585.895 COP/m² de área de intercambio. La eficiencia del equipo empleado para la recuperación de calor es del 85,00% (DML & Cía. Ltda., 2011).

8.2. CONTROL DE LA RELACIÓN AIRE- COMBUSTIBLE (CRAC)

Los sistemas de control de la relación aire combustible empleados a nivel industrial se basan en el control lógico programable (PLC) los cuales proporcionan seguridad y operación eficiente de los procesos de combustión, sin la necesidad de la supervisión constante del operador. La implementación de los sistemas de control de la relación aire combustible permite beneficios como la reducción en el nivel de emisiones existentes, y ahorros en los costos del proceso. Además, se considera como una de las alternativas de fácil implementación.

El control de la relación aire combustible suministra la cantidad adecuada de aire de combustión para el funcionamiento del quemador. El exceso de aire varía basado en el diseño específico del quemador, pero generalmente los quemadores operan con un exceso de aire entre el 15% al 20% (Wu et al., 2012). Por lo tanto, la evaluación de los potenciales de ahorro de energía térmica al implementar sistemas de control de la

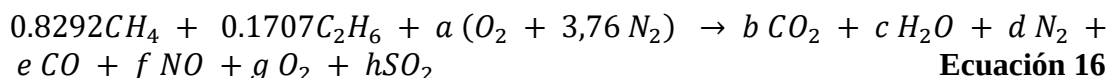
relación aire –combustible fueron calculados en los balances de masa y energía con un exceso de aire promedio del 17,5% en combustión. Al asumir el exceso de aire se calcula la relación aire-combustible real con la ecuación 14.

$$\text{Exceso de aire } [\%] = \frac{\text{Relación aire-combustible real}}{\text{Relación aire-combustible estequiométrica}} * 100 \quad \text{Ecuación 14}$$

Calculada la relación aire combustible real se evalúa el coeficiente estequiométrico del aire en la reacción de combustión, parámetro a en la ecuación 15.

$$\text{Relación aire combustible real} = 4,76 * a \quad \text{Ecuación 15}$$

Conocido el coeficiente estequiométrico del aire en la reacción de combustión del gas natural, se continúa evaluando los coeficientes estequiométricos de los reactivos y productos involucrados en la reacción que se muestra en la ecuación 16. Se evalúa también el balance de energía en la nueva condición de proceso.



Los resultados de los potenciales de ahorro en el consumo de gas natural [m^3/t], eficiencia del proceso, y los costos de la energía ahorrada se muestran en la Tabla 16. Los costos de la energía ahorrada corresponden a la diferencia entre el consumo de gas natural en las condiciones de operación actuales en cada una de las empresas y el consumo de gas natural al sostener el exceso de aire en el nivel propuesto.

En el sector de fundición de metales con las cinco empresas intervenidas en la región del Valle del Cauca y Cauca, se observó que al controlar la relación aire combustible con un exceso de aire del 17,5% se logran incrementos en la eficiencia del proceso del 28,18 % al 51,22%, de acuerdo al nivel de exceso de aire con el cual opera actualmente la empresa. Con el incremento de la eficiencia del proceso se logran

ahorros en el consumo de gas natural de 0,60 m³/t de aluminio, hasta un nivel máximo de 43,16 m³/t, equivalentes en un rango de ahorros económicos de \$829 COP/t a \$59.177 COP/t del metal elaborado. Respecto al consumo total por tonelada de metal elaborado se logran porcentajes de ahorro entre el 0,77% al 30,43%.

Tabla 16. Potenciales de ahorro de energía térmica con el control de la relación aire combustible con el exceso de aire en 17,5%.

Empresa	Eficiencia del Proceso	Consumo de Gas Natural [m ³ /h]	Ahorro Consumo de Gas Natural			Potencial de ahorro Económico [\$/t]
			[m ³ /t]	[%]*	[KWh/t]	
Alumina S. A H610	37,82	160,83	0,81	1,41	9,60	1.112,23
Alumina S. A H612	29,29	181,01	0,60	0,77	7,16	829,32
Propulsora S. A H6	28,18	47,32	43,16	30,43	510,56	59.177,22
Fundiciones Universo S. A H1	32,73	6,535	8,45	29,94	99,99	11.585,18
Gerdau Diaco S. A	51,22	1093,0129	1,78	5,25	21,02	2.435,97
Sidoc S. A H2	34,42	710,61	3,85	7,76	40,01	5.277,45

*Corresponde al porcentaje de ahorro de combustible respecto al consumo total por tonelada de material.

De acuerdo a los niveles de producción anuales de cada uno de los equipos intervenidos en las empresas, se evaluó el potencial de ahorro económico anual. En grandes empresas como Alumina S. A, donde el nivel de producción de aluminio en el horno 610 es de 12.228 toneladas de Aluminio y en el horno 612 es de 12.102 toneladas, se logra un ahorro económico anual de \$ 13.600.691 COP, y \$ 10.036.728 COP, respectivamente. En una empresa pequeña, del sector de fundición de aluminio, Propulsora S. A, donde el nivel de producción anual en el horno 6 es de 1.244 toneladas de aluminio, se logra un ahorro económico de \$ 73.646.647 COP; incrementando la eficacia desde 19,19% del estado actual, a una eficiencia de proceso con el control de la relación aire combustible de 28,18%. En dos grandes empresas de fundición de metales ferrosos, en el proceso de calentamiento de palanquilla, como

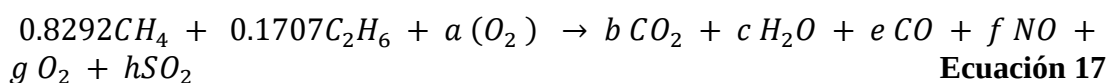
son Gerdau Diaco S. A y Sidoc S. A, donde los niveles de producción anual son de 122.926 toneladas y 126.432 toneladas, respectivamente; se logran ahorros económicos anuales de \$299.444.657 COP en Gerdau Diaco S. A, y \$ 667.238.991 COP, en el caso de Sidoc S.A. En Fundiciones Universo S. A, empresa grande, del sector de fundición de metales ferrosos, en el proceso de tratamientos térmicos, se tiene un nivel de producción anual de 1.877 toneladas de acero tratado, logrando un ahorro económico anual controlado el exceso de aire en el horno 1 de \$21.745.386 COP.

Los sistemas de control de la relación aire combustible son tecnología comercial, con un costo de capital estimado de 2.307,79 \$/t (Industrial Efficiency Technology Database, 2012).

8.3. ENRIQUECIMIENTO DEL AIRE DE COMBUSTIÓN CON OXÍGENO (EACOX)

Durante el proceso de combustión el oxígeno puede ser empleado puro o utilizado para enriquecer el aire a más del 21%. Aplicado como oxígeno puro se desplaza el nitrógeno en el proceso de combustión y da como resultado una transferencia de calor mejorada y una reducción significativa en las pérdidas de calor de los gases de combustión. Esto debido al aumento de la temperatura de la llama, y la disminución del volumen de gases de combustión. Un ejemplo de su aplicación es el caso del horno de fundición de Alumina S. A, horno 1070.

La evaluación de los potenciales de ahorro de energía se realiza con la consideración de un proceso de combustión del combustible (gas natural) en la presencia de oxígeno puro, como se muestra en la reacción de la ecuación 17; y se compara con los procesos convencionales en los cuales se emplea aire ambiente, con un contenido de oxígeno del 21% en volumen.



Se evaluó el ahorro en el consumo de gas natural en unidades de volumen [m³/t], ahorro en el consumo de gas natural en unidades de energía [KWh/t], eficiencia del proceso, consumo de gas natural al emplear oxicomcombustión. Los resultados se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Potenciales de ahorro de energía térmica con la implementación de oxicomcombustión.

Empresa	Eficiencia del Proceso [%]	Consumo de Gas Natural [m ³ /h]	Ahorro Consumo de Gas Natural			Potencial Ahorro Económico [\$ /t]
			[m ³ /t]	[%]*	[KWh/t]	
Alumina S. A H610	46,78	125,52	13,30	23,05	157,39	18.242
Alumina S. A H612	36,09	134,05	20,79	26,52	245,97	28.510
Propulsora S. A H6 Fundiciones	28,75	45,41	47,14	33,25	557,73	64.645
Universo S. A Horno 1	40,02	4,98	13,14	46,60	155,53	18.020
Gerdau Diaco S. A	74,01	716,93	12,81	37,85	151,65	17.571
Sidoc S. A H2	47,22	535,94	15,09	30,43	156,89	20.696

*Corresponde al porcentaje de ahorro de combustible respecto al consumo total por tonelada de material.

La implementación de la tecnología de oxicomcombustión permite incrementar la eficiencia de los procesos de fundición, calentamiento y tratamiento térmico de los metales entre un 10-28% de la eficiencia de los procesos convencionales. Se logra un ahorro económico en un rango de \$17.571 a \$64.645 COP/t de producto, relacionado a las características del proceso de producción realizado. De acuerdo a los niveles de producción anual en cada de estas empresas, para el caso de Fundiciones Universo S. A se logra un ahorro económico anual de \$ 33.822.711 COP, en el tratamiento térmico de piezas de acero. En Propulsora S. A, la implementación de la oxicomcombustión al horno de fundición de aluminio permitiría un ahorro económico anual de \$ 80.450.970 COP, pues esta tecnología logra un incremento de la eficiencia del proceso del 9,56%. En Alumina S. A, la

implementación de la tecnología de oxidcombustión a los hornos 610 y 612 permitiría un ahorro económico anual de \$ 568.109.374 COP. Mientras en grandes empresas de producción de acero como Gerdau Diaco S. A y Sidoc S. A, con un nivel de producción promedio de 124.600 toneladas de acero anual, se logra un ahorro económico promedio de \$2.388.250.395 COP.

El costo de la inversión para la operación con oxígeno enriquecido es suministrado por Cryogas grupo de Air Products. De acuerdo a los balances de materia se evaluó el requerimiento de oxígeno, y de esta forma se calcula el costo de la inversión. Con los resultados del costo de la inversión en cada una de las compañías intervenidas, se evalúa la mediana estadística, que corresponde al valor central del costo de la inversión por tonelada de metal elaborado, donde se obtuvo un costo para la operación con oxígeno de \$4.095.500 COP/t de metal elaborado.

8.4. IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR UN CICLO RANKINE ORGÁNICO (ORC)

La tecnología de Ciclo Rankine Orgánico (ORC) es una alternativa disponible probada para la recuperación de energía residual y lograr aumentar la eficiencia energética. La planta de PureCycle genera electricidad desde el calor residual de los gases, la potencia neta de la planta es de 200 kW, con una temperatura de la fuente de calor residual de 260°C a 540°C (UTC Power, 2004). Sin embargo, diferentes compañías en Estados Unidos y otros países ofrecen esta tecnología, desde tamaños de 30 kW hasta los 22 MW de energía generada (Nimbalkar & Oak Ridge National Laboratory, 2015).

En Colombia este tipo de tecnología está tratando de incursionarse a nivel industrial, pero en este caso son los centro de investigaciones quienes están tropicalizando y adaptando la tecnología con miras a la disminución de costos de inversión por medio de la fabricación de partes en el mercado local y trabajando en la integración de la tecnología con diferentes fuente de calor para hacer de ésta una solución robusta y viable (Lopez, 2013).

En la evaluación técnica de la recuperación del calor de los gases de combustión en los diferentes procesos intervenidos para la generación de energía eléctrica se basó en los balances de materia y energía, complementada con información operativa como es la eficiencia del ciclo del 10% (Sánchez-Junco, 2012). Los resultados de la generación de energía eléctrica, y el ahorro económico se muestran en la Tabla 18. El costo de la energía eléctrica se tomó de la Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica ACOGEN y corresponde a un precio promedio ponderado de 111,18 \$/KWh (Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica, 2017).

El potencial de generación de energía eléctrica en las empresas intervenidas en el Valle del Cauca y Cauca del sector de fundición de metales es considerable basado en la temperatura de salida de los gases de combustión al ambiente, la cual se encuentra en un rango de 143,60-1095,80°C; en comparación con la planta de PureCycle en los Estados Unidos que posee una fuente de energía residual con una temperatura de 260°C a 540°C. De acuerdo a los reportes de consumo de energía eléctrica brindado por algunas de las empresas intervenidas como Gerdau Diaco S. A, la implementación de un Ciclo Rankin Orgánico en el horno de calentamiento de palanquilla Bendotti permite la generación del 41,65% de la energía eléctrica consumida anualmente en la empresa, logrando un ahorro económico anual de \$698.251.060 COP. Sin embargo, la generación de energía eléctrica por medio de un Ciclo Rankine Orgánico se puede ver aumentada al considerar otras fuentes de energía residual en la planta; por ejemplo los gases de combustión de la fundición de la chatarra en los hornos de arco eléctrico.

Tabla 18. Potenciales de ahorro de energía térmica usando un Ciclo Rankin Orgánico para generar energía eléctrica.

Empresa	Temperatura de Salida de los Gases [°C]	Energía Disponible para la producción ORC [KW/t]	Producción Máxima de energía eléctrica [KW/t]	Horas de Operación Anual	Producción anual de energía eléctrica [kWh]	Consumo anual de energía eléctrica [kWh]	Potencial Ahorro Económico [\$t]
Alumina S. A- H610	997,50	245,74	24,57	6.300	437.652	--	2.732
Alumina S. A -H612	1.095,80	246,02	24,60	6.864	392.895	--	2.735
Alumina S. A -H1070	752,40	196,33	19,63	8.400	663.678	--	2.183
Propulsora S.A-H6	648,54	812,38	81,24	2.700	105.230	303.493	9.032
Fundiciones Universo S. A Horno 1	579,00	214,97	21,50	6.023	42.813	--	2.390
Gerdau Diaco S. A	143,60	221,48	22,15	8.322	6.280.366	15.076.984	2.462
Sidoc S. A	581,30	230,14	23,01	8.322	2.974.977	15.642.480	2.559

-- La información de consumo anual de energía eléctrica no fue suministrada por la empresa.

En Sidoc S. A, la implementación del Ciclo Rankine Orgánico al horno de calentamiento de palanquilla #2, permite la generación del 19,02% de la energía consumida en la planta, con un ahorro económico anual de \$330.757.895 COP. En una evaluación económica de una empresa de consultoría, Azimut Consultores S.A.S, donde se evaluaron los potenciales de ahorro en el horno de arco eléctrico, se estimó que a partir de los gases de combustión en la fundición de la chatarra para la elaboración del acero se lograría una generación de energía eléctrica de 1 MW, que equivalen a un ahorro económico anual de acuerdo a la energía generada de hasta \$ 1.144.000.00 COP. Por lo tanto, al implementar un sistema de generación de energía eléctrica en Sidoc S. A se lograría globalmente un ahorro económico anual de \$ 1.474.757.895 COP.

En una empresa como Alumina S. A, la implementación de un Ciclo Rankine Orgánico a los hornos de fundición de aluminio, permitiría una generación total de 1.494.224 kWh, equivalente a un ahorro económico anual de \$ 166.127.846 COP.

En otras empresas pequeñas, como es Propulsora S. A, donde el tiempo de operación anual es bajo, 2700 horas anuales, pero con fuentes de calor residual de 648,54°C, se lograría generar el 34,67% de la energía eléctrica consumida, con un ahorro económico de \$ 11.699.434 COP. Sin embargo, el bajo tiempo de operación de la planta, y la variación en el proceso de producción, no brindan estabilidad de la fuente de energía residual (gases de combustión) al sistema de generación de energía eléctrica; por lo que se considera como una alternativa no viable técnicamente en empresas pequeñas como Propulsora S.A. En Fundiciones Universo S. A, en el proceso de generación de energía eléctrica por la implementación de un Ciclo Rankine Orgánico al horno #1 de tratamientos térmicos, lograría una generación de 42.813 kWh, equivalente a un ahorro económico anual de \$ 4.759.998 COP. Sin embargo, Fundiciones Universo S. A lograría incrementar el potencial de generación de energía eléctrica evaluando otros procesos realizados en la empresa.

En la evaluación del costo de inversión para la implementación de la tecnología ORC se realizó con base al estudio de factibilidad para la implementación de un Ciclo Orgánico de Rankine en pozos de extracción de petróleo, en el cual se consultaron proveedores de la tecnología ORC. El costo unitario de la instalación es de \$ 8.346.011 COP/kWe (Cuadrado Peña, Colorado Granda, Cobos Gómez, & Vásquez Rueda, 2015)ⁱ.

8.5. QUEMADORES AUTO-RECUPERATIVOS O AUTO-REGENERATIVOS (QAR)

Los quemadores auto-recuperativos o auto-regenerativos son el método más eficiente para recuperar el calor sensible portado por los productos de combustión en hornos industriales operando a altas temperaturas. La transición tecnológica a este tipo de quemadores es una alternativa mencionada desde 1990 en los Estados Unidos (IEA, 2007). El potencial de ahorro de energía térmica (gas natural) de acuerdo a diferentes referencias bibliográficas consultadas se encuentra en un rango del 35-50% (Osaka Gas Co. Ltd, 2015), dependiendo de la temperatura del horno, el exceso de aire, y los patrones de funcionamiento de la unidad instalada. En Norte América existen más de 80 hornos (en operación) con esta tecnología, y han alcanzado ahorros entre el 50-60% de la energía empleada (Bratu, Gaba, Stoian, & Anghelina, 2016).

La evaluación de los potenciales de ahorro de la energía térmica al implementar quemadores auto-regenerativos o auto-recuperativos, se estiman con base al indicador de ahorro energético publicado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de 0,70 GJ/t de producto (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2012). En las empresas intervenidas en el proyecto se evalúan los potenciales de ahorro en el consumo de gas natural en unidades de volumen [m^3/t], ahorro en el consumo de gas natural en unidades de energía [KWh/t], eficiencia del

proceso, consumo potencial de gas natural con la implementación de la tecnología; así como los ahorros económicos. Los resultados se muestran en la Tabla 19.

La implementación de quemadores auto-regenerativos o auto-recuperativos a los procesos de fundición de aluminio, calentamiento de palanquilla y tratamientos térmicos permite el incremento de la eficiencia de los procesos actuales entre un 7-30%, logrado un ahorro económico de \$22.979 COP/t de producto. Respecto a los consumos de gas natural al emplear quemadores regenerativos, se lograría la disminución del consumo en un rango del 11,59% al 70,99% de los consumos actuales.

Tabla 19. Potenciales de ahorro de energía térmica con la implementación de quemadores auto –regenerativos.

Empresa	Eficiencia del Proceso [%]	Consumo de Gas Natural [m ³ /h]	Ahorro Consumo de Gas Natural			Potencial de ahorro Económico [\$ /t]
			[m ³ /t]	[%]*	[KWh/t]	
Alumina S. A H610	50,33	116,66	16,44	28,48	194,44	22.537
Alumina S. A H612	33,56	144,18	16,44	20,96	194,44	22.537
Alumina S. A H1070	50,69	30,96	16,44	70,99	194,44	22.537
Propulsora S. A H6	30,46	60,13	16,44	11,59	194,44	22.537
Fundiciones Universo S. A	51,18	3,90	16,43	58,24	194,44	22.528
Gerdau Diaco S. A	75,2	593,73	16,43	48,53	194,44	22.528
Sidoc S. A	62,05	479,83	18,71	37,72	194,44	25.649

*Corresponde al porcentaje de ahorro de combustible respecto al consumo total por tonelada de material.

El costo de la inversión estimado para esta tecnología es de \$9.724.436 COP/t producto; se hace referencia a las toneladas como la capacidad nominal para la cual estarán diseñados los quemadores. Los proveedores de la tecnología consultados

fueron Coen y Hamworthy Combustion, Honeywell Eclipse. En el Anexo 7 se muestra las cotizaciones realizados para la tecnología (John Zink Company, 2017)(Eclipse Innovative Thermal Soluciones, 2017).

8.6. QUEMADORES FLAMELESS (QF)

Los quemadores flameless o sin llama, es una tecnología comúnmente empleada en los hornos de arco eléctrico para sostener la temperatura del aire precalentado por debajo de los 480°C y así disminuir la formación de NO_x (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2012).

Según datos de la Industrial Efficiency Technology database (IETD), en Francia existe un caso de conversión de cinco hornos tipo cuba a hornos de oxidación sin llama, logrando una reducción del 40% en el consumo de combustible. En los Estados Unidos, existe un caso de la implementación exitosa de esta tecnología en un horno de recalentamiento de palanquilla tipo solera giratoria, logrando una reducción en el 60% en el consumo de combustible (Institute for Industrial Productivity, 2012). En una publicación de Linde Group, líder mundial en el mercado de gases industriales, y construcción de plantas industriales llave en mano; en conjunto con ArcelorMittal describen los beneficios de la utilización de la tecnología de oxidación sin llama en hornos continuos de recalentamiento de acero, mencionando el incremento de la capacidad de recalentamiento, y reducción en el consumo de combustible; se obtuvieron consumos específicos de 1,16 GJ/t para el recalentamiento de palanquilla de acero de 6.5 pulgadas, utilizando quemadores de combustión sin llama en un horno rotatorio. La compañía Linde y expertos en ingeniería de procesos han convertido 110 hornos en el mundo a la tecnología de oxidación sin llama (Gavigan, 2008)

De acuerdo a lo anterior la tecnología de oxidación sin llama, es una alternativa viable para los procesos de calentamiento de palanquilla en empresas como Sidoc S. A y Gerdau Diaco S.A. La evaluación de los potenciales de ahorro con dicha tecnología se realiza con base al consumo específico de 1,16 GJ/t para el recalentamiento de palanquilla en un horno rotatorio de oxidación sin llama (Gavigan, 2008). El potencial de energía ahorrada se calcula de acuerdo a la ecuación 18, y la eficiencia del proceso se evalúa con el consumo específico de la nueva tecnología y las condiciones del proceso actual. Los resultados se muestran en la Tabla 20.

$$\begin{aligned} \text{Energía ahorrada} \left[\frac{kWh}{t} \right] = & \\ \text{Consumo específico proceso convencional} \left[\frac{kWh}{t} \right] - & \\ \text{Consumo específico quemadores flameless} \left[\frac{kWh}{t} \right] & \end{aligned} \quad \text{Ecuación 18}$$

Tabla 20. Potenciales de ahorro de energía térmica con la implementación de quemadores flameless.

Empresa	Eficiencia del Proceso [%]	Consumo de Gas Natural [m³/h]	Ahorro Consumo de Gas Natural			Potencial de ahorro Económico [\$t]
			[m³/t]	[%]	[kWh/t]	
Gerdau Diaco S. A	57,19	927,68	6,63	19,58	78,45	9.089
Sidoc S. A	52,60	481,50	18,60	37,50	193,33	25.503

La implementación de quemadores tipo flameless a los procesos de calentamiento de palanquilla permite que la eficiencia del proceso se encuentre en un rango del 52,60% al 57,19%, incrementando en relación de la eficiencia de los procesos actuales entre un 10-20%. El consumo de gas natural con los quemadores tipo flameless se logra disminuir entre un 19,58% a 37,50%, con un ahorro económico en un rango de \$9.089-25.503 COP/t de producto. En la evaluación de los potenciales de ahorro anual, de acuerdo a un nivel de producción promedio de 124.600 toneladas de acero anual en cada una de estas empresas, se logran ahorros económicos superiores a los 1.117 millones de pesos colombianos.

Aunque no se tiene un costo de capital de la implementación de dicha tecnología, se conocen proveedores internacionales como son: Bloomengineering, Esa Pyronics International, John Zink Hamworthy, y WS Thermal Process Technology (Direct Industry, 2017). Sin embargo, se debe verificar que las capacidades de los equipos empleados a nivel nacional sean disponibles en los proveedores internacionales.

8.7. RECUPERACIÓN DE CALOR EN LOS GASES DE COMBUSTIÓN PARA EL PRECALENTAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA (RCGCM)

El precalentamiento de la carga es una alternativa empleada en los procesos de fundición y vertido. Por lo tanto, las empresas del sector fundiciones de metales no ferrosos o aluminio intervenidas en la región del Valle del Cauca, y Cauca son idóneas para la implementación de esta tecnología. Esto debido a la distribución del sistema de expulsión de gases de combustión, y el ingreso de la materia prima a los hornos de fundición. En las otras empresas del sector de fundición de metales ferrosos, donde se diagnosticaron los procesos de calentamiento de palanquilla y tratamientos térmicos, se presenta la dificultad de la distancia y distribución de los sistemas de expulsión de gases en los procesos de calentamiento de palanquilla y tratamientos térmicos, para emplearlos en el proceso de fundición de acero.

La incorporación del precalentamiento de la carga se realiza sobre el diseño del horno, de tal forma que los gases calientes se desplazan en dirección de flujo contrario a la carga.

La evaluación de los potenciales de ahorro al incorporar la carga caliente en el proceso de fundición de aluminio se realiza con base al balance de materia y energía realizado en el equipo. La temperatura de precalentamiento de la carga es de 296°C.

Aunque en algunos proyectos implementados de hornos para el precalentamiento de aluminio se considera como temperatura de precalentamiento los 196°C, el incremento de 100°C disminuye en mayor proporción las pérdidas de energía en gases de combustión. (Wei, 2013). Se consideró una eficiencia en el intercambio de calor solido (aluminio cargado) y gases de combustión del 35%. La temperatura de salida de los gases después del sistema de RCGCM se evaluó de acuerdo a la ecuación 19.

$$\eta \sum_{i=0}^i m_i C_{P,i} (T_{sal,g} - T_{ent,g}) = m_{Aluminio} C_{P,Aluminio} (T_{sal,a} - T_{ent,amb}) \quad \text{Ecuación 19}$$

Evaluada la temperatura de salida de los gases, se procede a evaluar las pérdidas de energía en los gases de combustión, y la energía suministrada al sistema al ingresar la carga precalentada, de acuerdo a la ecuación 20; donde se tiene en cuenta la energía suministrada actualmente al sistema, menos la energía recuperada en el calentamiento de la carga dado a que proviene de los gases de combustión calientes que se retiran del sistema.

$$E_{h,fuel} = V_f * H_l - \rho V C_s (T_c - T_0) \quad \text{Ecuación 20}$$

Dónde:

V_f = Consumo actual de combustible por tonelada de producto.

H_l = Poder calorífico neto por unidad de combustible.

ρ = Densidad del metal [Kg/m³]

V = Volumen del metal que se calienta [m³]

C_s = Calor específico del metal sólido [J/kg °C]

T_c = Temperatura de fusión del metal [°C]

T_0 = Temperatura inicial, generalmente la ambiente [°C]

Los resultados de los potenciales ahorros en el consumo de gas natural [m³/t], eficiencia del proceso, y los costos de la energía ahorrada se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Potenciales de ahorro de energía térmica al implementar calentamiento de la carga en la fundición de aluminio.

Empresa	Temperatura de los gases después del Intercambiador [°C]	Eficiencia del Proceso del Carga Precalentada [%]	Consumo de Gas Natural [m³/h]	Ahorro Consumo de Gas Natural			Potencial Ahorro Económico [\$/t]
				[m³/t]	[%]*	[kWh/t]	
Alumina S. A H610	331,62	39,53	148,53	5,16	8,95	61,07	7.078
Alumina S. A H612	532,57	28,39	170,41	5,16	6,58	61,07	7.078
Propulsora S.A-H6	463,15	19,92	65,54	5,16	3,64	61,07	7.078

*Corresponde al porcentaje de ahorro de combustible respecto al consumo total por tonelada de material.

Implementar a los sistemas de fundición de aluminio una tecnología para el precalentamiento de la carga hasta una temperatura promedio de 296°C, permite el incremento de la eficiencia del proceso entre el 1-4%, logrando un ahorro en el consumo de gas natural de 5,16 m³/t de aluminio fundido; los cuales representan ahorros en el consumo de gas natural por tonelada de metal elaborado en empresas como Alumina S. A del 6,58% al 8,95%. En Propulsora S. A representa un ahorro en el consumo del gas natural del 3,64%. En términos económicos el potencial de ahorro es de \$7.078 COP/t. De acuerdo al nivel de producción de Alumina S. A en cada uno de los hornos se logra un ahorro económico anual promedio de \$ 86.107.411 COP; mientras en Propulsora S. A se logra un ahorro económico de \$ 8.808.787 COP.

El costo de inversión para el precalentamiento de la carga fue estimado en \$ 68.649 COP/t de aluminio (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2012). De acuerdo al nivel de producción anual en cada una de las empresas intervenidas, el precalentamiento de la carga en empresas como Alumina S. A ocasiona un costo de inversión de \$ 839.465.213 COP. Mientras en Propulsora S. A se obtiene un costo de inversión de \$ 85.434.840 COP.

9. PROGRAMA DE MEJORA DE LA ENERGÍA TÉRMICA PARA EL SECTOR DE FUNDICIONES

Una vez evaluadas las propuestas para el ahorro de energía térmica en el sector de fundición de metales, se procede a analizar cuál de ellas tiene mayor potencial de ahorro de energía térmica, alcanzando un mayor ahorro económico sobre los costos del proceso de producción. Sin embargo, se debe tener en cuenta los potenciales costos de inversión para la implementación de la propuesta; analizando la relación entre el costo de inversión y el costo de la energía ahorrado anualmente, término que se conoce como tiempo de retorno de la inversión. El tiempo de retorno de la inversión es un indicador financiero que permite medir el plazo de tiempo que se requiere para que los flujos netos de efectivo de una inversión recuperen su costo o inversión inicial. En la Tabla 22 se presenta el costo energético para la producción de una tonelada de producto, los potenciales ahorros económicos para cada una de las propuestas en las empresas intervenidas donde aplique dicha tecnología, y el porcentaje de ahorro económico respecto al costo energético de una tonelada de producto.

Los resultados del cuadro comparativo de las propuestas de ahorro de energía térmica en el sector de fundición de metales en el Valle del Cauca y Cauca muestran que la alternativa con mayor potencial de ahorro económico es el precalentamiento del aire de combustión, con un ahorro económico equivalente a la mediana entre las empresas intervenidas de \$ 31.554 COP/ t de metal elaborado, correspondiente a un porcentaje de ahorro con respecto al costo energético térmico para la producción de una tonelada del producto del 50,55%. En la segunda posición se encuentra la implementación de quemadores auto-regenerativos o auto-recuperativos, con el cual se logra un ahorro en los costos de producción de \$ 22.538 COP/t de producto, equivalente a un porcentaje de ahorro del 37,72%. Seguido, se encuentra la aplicación del proceso de

oxicombustión, con el cual se logra un ahorro económico de \$ 19.469 COP/t de producto, correspondiente a un porcentaje de ahorro del 31,84%.

Tabla 22. Cuadro comparativo de los potenciales de ahorro económico para cada una de las propuestas en las empresas intervenidas en el Valle del Cauca y Cauca.

Empresa	Costo Energético [\$/t]	RCGCA		CRAC		EACOX		ORC		QAR		QF		RCGCM	
		[\$/t] ^a	[%] ^b	[\$/t] ^a	[%] ^b	[\$/t] ^a	[%] ^b	[\$/t] ^a	[%] ^b	[\$/t] ^a	[%] ^b	[\$/t] ^a	[%] ^b	[\$/t] ^a	[%] ^b
Alumina S.A- H610	79.127	24.739	31,26	1.112	1,41	18.242	23,05	2.732	3,45	22.538	28,48	17.571	--	7.078	8,95
Alumina S.A H612	107.512	37.496	34,88	829	0,77	28.510	26,52	2.735	2,54	22.538	20,96	--	--	7.078	6,58
Alumina S.A H1070	31.748		--	0	--	--	--	2.183	6,88	22.538	70,99	--	--		--
Propulsora S.A-H6	194.416	132.691	68,25	59.177	30,44	64.645	33,25	9.032	4,65	22.538	11,59	--	--	7.078	3,64
Fundiciones Universo S.A Horno 1	38.681	25.612	66,21	11.585	29,95	18.020	46,59	2.390	6,18	22.529	58,24	--	--	--	--
Gerdau Diaco S.A	46.422	--	--	2.436	5,25	17.571	37,85	2.462	5,30	22.529	48,53	9.089	19,58	--	--
Sidoc S.A	68.008	--	--	5.277	7,76	20.696	30,43	2.559	3,76	25.650	37,72	25.503	37,50	--	--
TOTAL	--	220.538		80.417		167.683		24.093		160.857		52.163		21.234	
MEDIANA	68.008	31.554	50,55	2.436	6,50	19.469	31,84	2.559	4,65	22.538	37,72	17.571	28,54	7.078	6,58

Recuperación de calor de los gases de combustión para el calentamiento del aire de combustión (RCGCA), Control de la relación aire-combustible (CRAC); Enriquecimiento del aire de combustión con oxígeno (EACOX), Ciclo Rankine Orgánico (ORC), Quemadores auto-regenerativos ó auto-recuperativos (QAR), Quemadores flameless (QF), Recuperación del calor de los gases de combustión para el precalentamiento de la materia prima (RCGCM)

a. Potencial Ahorro Económico [\$/t] calculados en la sección 8

b. Potencial de ahorro económico respecto al costo energético del producto [%]

En la quinta posición de las propuestas de ahorro de energía térmica se encuentra la generación de energía eléctrica a partir de un Ciclo Rankin Orgánico, la cual logra un ahorro económico de acuerdo a la mediana de \$ 2.559 COP/ t de producto, correspondiente a un porcentaje de ahorro del costo energético del 4,65%. El bajo potencial de ahorro económico que se logra con esta alternativa es debido a la eficiencia del ciclo termodinámico, que permite la transformación del 10% de la energía perdida en gases de combustión en energía eléctrica para el suministro de la planta. Aunque algunas referencias mencionen que a pesar de las bajas eficiencias de los ORC, es una alternativa considerada debido a que la fuente que aporta el calor requerido para el proceso, prácticamente es gratis, y si no se recupera, en todo caso se perderá sin aportar ningún valor adicional (Manrique Moreno, 2015). Sin embargo, las otras alternativas mencionadas para la recuperación de calor de los gases de combustión logran mayores ahorros económicos por tonelada de metal producido.

En el último lugar entre las propuestas de ahorro de energía térmica se encuentra el control del exceso de aire, con la cual se logra un ahorro económico de \$ 2.436 COP/t de producto, que representan un porcentaje de ahorro respecto al costo energético del producto de 6,50%.

De acuerdo a los costos de inversión que se presentaron para cada una de las propuestas de ahorro de energía térmica en la sección 8, sin incluir los quemadores flameless debido a la falta de información sobre el potencial costo de inversión de esta tecnología; se evaluaron los costos totales de inversión en cada una de las empresas, los resultados se muestran en la Tabla 23. El mayor costo de inversión es para la propuesta de oxidación, debido al costo fijo del suministro de oxígeno para el proceso de combustión.

Tabla 23. Costos de inversión de las propuestas de ahorro de energía térmica en las empresas del sector de fundición de metales ferrosos y no ferrosos en el Valle del Cauca y Cauca.

COSTOS DE INVERSIÓN	RCGCA [\$]	CRAC [\$]	EACOX [\$]	ORC [\$]	QAR [\$]	RCGCM [\$]
Alumina S.A- H610	253.906.716	28.220.348	50.081.007.421	298.704.253	204.213.146	839.465.213
Alumina S.A - H612	297.780.837	27.929.567	49.564.974.372	270.948.748	155.590.969	830.815.392
Alumina S.A - H1070	--	--	--	163.857.234	252.835.324	--
Propulsora S.A- H6	916.272.508	2.872.068	5.096.891.191	705.697.779	58.346.613	85.434.840
Fundiciones Universo S.A - Horno 1	28.436.430	4.331.722	7.687.254.232	190.368.347	19.448.871	128.854.886
Gerdau Diaco S.A	--	283.687.394	503.443.480.958	426.402.887	388.977.421	8.438.793.686
Sidoc S.A	--	291.778.505	517.802.305.326	196.383.726	160.453.186	8.679.478.412

Recuperación de calor de los gases de combustión para el calentamiento del aire de combustión (RCGCA), Control de la relación aire-combustible (CRAC); Enriquecimiento del aire de combustión con oxígeno (EACOX), Ciclo Rankine Orgánico (ORC), Quemadores auto-regenerativos ó auto-recuperativos (QAR), Quemadores flameless (QF), Recuperación del calor de los gases de combustión para el precalentamiento de la materia prima (RCGCM)

Con los resultados de los costos de inversión y los potenciales de ahorros económicos anuales para cada una de las propuestas se evalúa el tiempo de retorno de la inversión, ver Tabla 24.

Tabla 24- Tiempo de retorno de la inversión de las propuestas de ahorro de energía térmica en el sector de fundición de metales ferrosos y no ferrosos en el Valle del Cauca y Cauca

TIEMPO DE RETORNO DE LA INVERSIÓN						
Empresa	RCGCA [Años]	CRAC [Años]	EACOX [Años]	ORC [Años]	QAR [Años]	RCGCM [Años]
Alumina S.A H610	0,84	2,07	224,50	8,94	0,74	9,70
Alumina S.A H612	0,66	2,78	143,65	8,19	0,57	9,70
Alumina S.A H1070	--	--	--	6,20	0,93	--
Propulsora S.A H6 Fundiciones	5,55	0,04	63,35	62,78	2,08	9,70
Universo S.A Horno 1	0,59	0,20	227,28	42,44	0,46	--
Gerdau Diaco S.A	--	0,95	233,08	1,41	0,14	--
Sidoc S.A	--	0,44	197,89	0,61	0,05	--
MEDIANA	0,75	0,69	211,20	8,19	0,57	9,70

Recuperación de calor de los gases de combustión para el calentamiento del aire de combustión (RCGCA), Control de la relación aire-combustible (CRAC); Enriquecimiento del aire de combustión con oxígeno (EACOX), Ciclo Rankine Orgánico (ORC), Quemadores auto-regenerativos ó auto-recuperativos (QAR), Quemadores flameless (QF), Recuperación del calor de los gases de combustión para el precalentamiento de la materia prima (RCGCM)

El menor tiempo de retorno de la inversión es para la implementación de quemadores auto-recuperativos o auto-regenerativos, el cual se logra en 0,57 años. De acuerdo a la clasificación de los costos de energía ahorrada, esta propuesta alcanzo la segunda posición con un costo de \$ 22.538 COP/t de producto, equivalente a un porcentaje de ahorro del costo energético del producto de 37,72%, por lo cual se puede decir que es una alternativa factible económicamente para la implementación en el sector de fundiciones.

En el segundo lugar se encuentra el control del exceso de aire, con un tiempo de retorno de la inversión de 0,69 años; a pesar que en la clasificación de acuerdo a los potenciales de ahorro económico por tonelada de producto ocupa la última posición,

con un potencial de ahorro de \$ 2.436 COP/t de producto, que representan un porcentaje de ahorro en el costo energético del producto del 6,50%. Sin embargo, esta propuesta presenta un bajo costo de inversión para su implementación; por lo cual se considera una alternativa factible para su inclusión en el programa de ahorro de energía térmica.

En el tercer lugar se encuentra la recuperación de calor de los gases de combustión para calentamiento del aire (RCGCA) con un tiempo de retorno de la inversión de 0,75 años. Esta propuesta se ubicó en el primer lugar en relación al potencial de ahorro económico, el cual fue de \$ 31.554 COP/ t de metal elaborado, equivalente a un porcentaje de ahorro del respecto al costo energético del producto del 47,22%.

En el cuarto lugar se encuentra la implementación de un Ciclo Rankine Orgánico para la generación de energía eléctrica, con un tiempo de retorno de la inversión de 8,19 años, y un potencial de ahorro económico de \$ 2.559 COP/ t de producto, equivalente a un porcentaje de ahorro del costo energético del 4,65%.

La tecnología de oxidcombustión, a pesar de lograr un costo de la energía ahorro de \$ 19.469 COP/t de producto, que corresponde a un ahorro del 28,47% del costo energético del producto. Es considerada como una alternativa poco factible debido al alto tiempo de retorno de la inversión, el cual es de 211,2 años. Esta propuesta o alternativa fue implementada en uno de los equipos de la empresa intervenida Alumina S. A, en el horno 1070. Sin embargo, actualmente el proceso de oxidcombustión no se realiza más en la empresa por razones económicas.

9.1. RANKING DE LAS ALTERNATIVAS DEL PROGRAMA DE MEJORA DE LA ENERGÍA TÉRMICA PARA EL SECTOR DE FUNDICIONES

De acuerdo a la evaluación de los criterios: potencial de ahorro económico (\$/t de producto), costos de inversión, tiempo de retorno de la inversión y a la inclusión un criterio ambiental denominado dióxido de carbono (CO₂) evitado, se realiza una priorización de las alternativas para la mejora de la energía térmica al sector de fundiciones. La evaluación del CO₂ evitado se realiza de acuerdo a los balances de materia y energía donde se calculó también la energía ahorrada.

La priorización de las alternativas se realiza con la aplicación de un análisis multicriterio conocido como Analytic Hierarchy Process (AHP) o Proceso Analítico Jerárquico, en el cual se asigna a cada uno de los criterios la preferencia o importancia al seleccionar una alternativa. La evaluación de la preferencia o importancia de los criterios se realizó por parte un grupo de expertos; donde el puntaje total de calificación de los criterios corresponde al 100%.

Los resultados de la priorización de los criterios muestran que el potencial de ahorro económico tiene un nivel de importancia del 34,35%, el costo de inversión tiene un nivel de importancia de 32,76%, el tiempo de retorno de la inversión es del 22,33%, y el CO₂ evitado del 10,56%. De acuerdo a las características de un análisis multicriterio se requiere igual número de criterios y alternativas a evaluar; al poseer cuatro criterios de evaluación de las alternativas, se incluyen las cuatro alternativas más factibles de implementación, entre ellas: recuperación de calor de los gases de combustión para el calentamiento del aire (RCGCA), control de la relación aire-combustible (CRAC), implementación de un sistema de generación de energía eléctrica por un Ciclo Rankine Orgánico (ORC), y quemadores auto-recuperativos o auto-regenerativos (QAR). La matriz de alternativas evaluada en cada uno de los criterios de priorización se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25. Matriz de alternativas evaluada en los criterios de priorización

Alternativas	Potencial Ahorro Económico [\$/t]	Costos de Inversión [\$/t]	CO₂ evitado [kg de CO₂/t]	TIR [Años]
RCGCA	31.554	14.182.872	49,66	0,75
CRAC	2.436	2.308	6,06	0,69
ORC	2.559	16.379.066	12,50	8,19
QAR	22.538	9.724.436	36,17	0,57

El CO₂ evitado en la alternativa de control de la relación aire combustible (CRAC) es de 6,06 Kg/t de metal elaborado, mientras para la propuesta de recuperación de calor de los gases para el calentamiento del aire (RCGCA) se logra una disminución en las emisiones del gas de efecto invernadero de 49,66 Kg de CO₂/t de metal elaborado. Los otros criterios de priorización que se muestran en la Tabla 25 se evaluaron en las secciones anteriores.

Con la evaluación del nivel de importancia de cada uno de los criterios se realiza la priorización de las alternativas con el método multicriterio AHP, en donde se obtiene:

- La primera alternativa del programa de mejora de la energía térmica es el control de la relación aire combustible, con un porcentaje de priorización del 41,69%. Esto debido al costo de inversión estimado en \$ 2.308 COP/t de metal elaborado (Industrial Efficiency Technology Database, 2012), y el potencial de ahorro económico alcanzado es de \$ 2.436 COP/t de producto, que representan un porcentaje de ahorro respecto al costo energético del producto de 6,50%, con un tiempo de retorno de la inversión de 0,69 años.
- La segunda alternativa del programa de mejora de la energía térmica es la recuperación de calor de los gases de combustión para el calentamiento del

aire (RCGCA) con un nivel de priorización del 29,78%. Esta alternativa tiene un potencial de ahorro económico de \$ 31.554 COP/ t de metal elaborado, correspondiente a un porcentaje de ahorro con respecto al costo energético térmico para la producción de una tonelada del producto del 50,55%. El costo de la inversión para la RCGCA se estimó \$1.585.895 COP/m² de área de intercambio. La eficiencia del equipo empleado para la recuperación de calor es del 85% (DML & Cía. Ltda., 2011) ; y el tiempo de retorno de la inversión es de 0,75 años.

- La tercera propuesta del programa de mejora de la energía térmica para el sector de fundición de metales, con un nivel de priorización de 25,17%, es la implementación de quemadores auto-regenerativos o auto-recuperativos (QAR), con el cual se logra un ahorro en los costos de producción de \$ 22.538 COP/t de producto, equivalente a un porcentaje de ahorro respecto al costo energético del producto del 37,72%. El costo de la inversión estimado para esta tecnología es de \$9.724.436 COP/t producto; se hace referencia a las toneladas como la capacidad nominal para la cual estarán diseñados los quemadores (John Zink Company, 2017)(Eclipse Innovative Thermal Solutions, 2017). El tiempo de retorno de la inversión es de 0,57 años.
- La cuarta alternativa del programa de mejora de la energía térmica para el sector de fundición de metales con un nivel de priorización del 3,34%, es la implementación de un sistema de generación de energía eléctrica por medio de un Ciclo Rankine Orgánico (ORC), con el cual se logra un potencial de ahorro económico de \$ 2.559 COP/ t de producto, correspondiente a un porcentaje de ahorro del costo energético del 4,65%. El costo de la inversión estimado con esta tecnología es de \$ 8.346.011 COP/kWe (Cuadrado Peña et al., 2015). El tiempo de retorno de la inversión para la implementación de un sistema de generación de energía ORC es de 8,19 años.

Aunque fueron consideradas siete alternativas para la mejora de la energía térmica al sector de fundición de metales; en el análisis multicriterio para la priorización de las alternativas solo se tienen en cuenta cuatro de ellas, debido a se requiere igual número de alternativas y criterios a evaluar, por lo cual se recomienda realizar un análisis económico en un mayor nivel de detalle en donde se incluyan criterios como costos de mantenimiento, operación y costos indirectos, de esta forma se lograría realizar un análisis de priorización de las siete alternativas.

9.2. ESTRATEGIA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS PARA LA MEJORA DE LA ENERGÍA TÉRMICA AL SECTOR DE FUNDICIONES

La implementación de las alternativas propuestas para la mejora de la energía térmica al sector de fundiciones depende de la disponibilidad de los recursos en las empresas del sector, así como de la captación de los incentivos vigentes en el país, y la disponibilidad en el país de proveedores de la tecnología. En relación a la captación de los incentivos vigentes para la industria se conocen programas como los siguientes:

- Estrategia Colombiana de desarrollo bajo en carbono.

La Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC) es un programa de planeación del desarrollo a corto, mediano y largo plazo liderado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS, a través de la Dirección de Cambio Climático y con apoyo del Departamento Nacional de Planeación – DNP y los Ministerios Sectoriales: Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Transporte y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Diseñado para enfrentar el cambio climático, consignadas en el CONPES 3700 de 2011, y recientemente en el Decreto 298 de 2016

sobre el Sistema Nacional de Cambio Climático (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible República de Colombia, 2017).

La ECDBC busca desligar el crecimiento económico nacional del crecimiento de las emisiones de GEI logrando maximizar la carbono-eficiencia de la actividad económica del país y contribuyendo al desarrollo social y económico nacional. A través de la ECDBC el país busca establecer un pilar de crecimiento económico que promueva la competitividad, el uso eficiente de los recursos, la innovación y el desarrollo de nuevas tecnologías.

- Programa nacional de Uso Racional y eficiente de la energía, PROURE.
Por medio de la resolución 41286, del 30 de diciembre del 2016, por la cual se adopta el plan de acción indicativo 2017-2022, en el cual se desarrolla el PROURE, donde se definen objetivos y metas indicativas de eficiencia energética, acciones y medidas sectoriales y estrategias base para el cumplimiento de la meta en Colombia en el marco del COP21 de reducir en un 20% las emisiones en el 2030, tomando como base las emisiones en 2010. La entidad responsable de la promoción, organización y aseguramiento del desarrollo es el Ministerio de Minas y Energía; y la Unidad de Planeación Minero Energética –UPME se encarga de fomentar, diseñar y establecer los planes, programas y proyectos de uso eficiente, ahorro y conservación de la energía (Ministerio de Minas y Energía República de Colombia., 2016).

Entre las acciones del plan Indicativo 2017-2022 para el sector industrial se conocen las medidas de eficiencia energética en gas natural para calor directo e indirecto, así como medidas transversales de buenas prácticas operativas (BPO) y diseño e implementación de Sistemas de Gestión de la Energía.

- Beneficios tributarios en Ciencia, Tecnología e Innovación.

Los Beneficios tributarios son un instrumento eficaz para fomentar la inversión en investigación, desarrollo e innovación y promover la competitividad en las empresas y el desarrollo de investigaciones de alto impacto para el país. Este instrumento desarrollado por el Gobierno Nacional busca ser un incentivo para los actores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTeI) en el desarrollo de sus proyectos de CTeI otorgando a los inversores y/o ejecutores, deducciones y exenciones de impuestos. Con la Ley 1819 de 2016, se dictaron disposiciones para la asignación de beneficios como es la deducción tributaria del 100% y un descuento tributario del 25% de la inversión realizada (COLCIENCIAS, 2017).

Con la finalidad de reglamentar los beneficios otorgados para CTeI, el Gobierno Nacional crea el Consejo Nacional de Beneficios Tributarios, quien se encarga de establecer los criterios y condiciones para calificar a los proyectos como de carácter científico, tecnológico y de innovación.

El Consejo Nacional se encuentra integrado por el director de Colciencias quién lo preside, el ministro de hacienda o crédito público o el director de la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales –DIAN - , el Ministro de Comercio, Industria y Turismo, el director del Departamento de Planeación Nacional, el Ministro de las TIC's y dos expertos en Ciencia, Tecnología e Innovación.

- Programa de Transformación Productiva.

El programa de Transformación Productiva (PTP) es una de las herramientas dispuestas por el Gobierno Nacional para la ejecución de la política industrial que conduzca al desarrollo productivo del país y con la que se generan entornos más competitivos y empresas más fuertes y productivas. El PTP es un aliado de los empresarios porque ofrece acompañamiento para

acelerar su productividad y competitividad, orientando sus capacidades y aprovechando sus ventajas comparativas (Ministerio de Comercio Industria y Turismo & República de Colombia, 2016).

El programa de transformación productiva mantiene un diálogo permanente con las empresas, estableciendo tres propósitos estratégicos como son: el fortalecimiento del aparato productivo, el desarrollo regional, y la internacionalización.

El programa es administrado por Bancóldex y el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo

CONCLUSIONES

Con base al diagnóstico de eficiencia energética realizado al subsector industrial de fundición de metales ferrosos y no ferrosos, en los departamentos del Valle del Cauca y Cauca, y el análisis de este subsector a partir de referentes internacionales, se logran efectuar las siguientes conclusiones:

- ✚ El perfil energético del subsector industrial de fundición de metales ferrosos y no ferrosos en el Valle del Cauca y Cauca, muestra que es un subsector industrial intensivo en el uso de energía térmica, para los procesos de fundición de aluminio, calentamiento de palanquilla y tratamientos térmico, donde el combustible empleado es gas natural, en procesos convencionales de combustión con aire del ambiente. Aunque en el proceso de calentamiento de palanquilla generalmente se emplean procesos de combustión con aire caliente, producto de la recuperación de calor de los gases de combustión.
- ✚ En el proceso de fundición de aluminio la industria de los departamentos del Valle del Cauca y Cauca emplea hornos reverberos con consumos específicos de combustible entre 2,46 GJ/t a los 6,04 GJ/t, con procesos convencionales de combustión. Mientras a nivel internacional, los consumos específicos reportados están entre 2,5 GJ/t a los 3,8 GJ/t. Se evidencia de esta forma un rezago en el indicador de consumo específico en las industrias de la región respecto a los estándares internacionales. Las eficiencias del proceso de fundición de aluminio en las empresas diagnosticadas oscilan entre el 19,19% al 36,00 %, donde la principal fuente de pérdida de energía es el calor sensible en los gases de combustión en un rango del 35,85% al 48,43%, debido a las altas temperaturas con la cual salen los gases de combustión, 648,54°C a 1.095,80°C.

- ✚ En los procesos de calentamiento de palanquilla intervenidos en la región, se emplean hornos de empuje, con solera fija, los cuales presentaron consumos específicos entre 1,44 GJ/t a 1,86 GJ/t. Mientras a nivel internacional el consumo específico reportado para el calentamiento de palanquilla es de 1,16 GJ/ t, evidenciando un rango de potencial de ahorro de energía térmica del 24,34% al 60,00%, de acuerdo a los referentes internacionales.

Las eficiencias de los hornos de calentamiento de palanquilla de la región oscilan entre el 32,85% al 46,00%, sin incluir la recuperación de calor de los gases de combustión; al tener en cuenta el calor recuperado la eficiencia del proceso de calentamiento de palanquilla se encuentra entre el 56,30% al 84,44%. Donde la principal fuente de pérdida de energía continua siendo en los gases de combustión; debido al exceso de aire que se presenta en los procesos, el cual fue calculado en un rango del 68,88% al 131,48%.

- ✚ En el tratamiento térmico realizado a los metales ferrosos como es el acero, se intervino un tratamiento térmico de revenido, donde se emplean hornos tipo solera móvil. El consumo específico calculado para el proceso fue de 1,20 GJ/t, con un referente internacional de 0,90 GJ/t, lo que representa un potencial de ahorro energético del 25,1%.

La eficiencia de un proceso de tratamiento térmico de revenido, se encuentra en 21,37%; y se identifica como la principal fuente de perdida de energía el calor sensible en los gases de combustión que corresponde al 64,39% de la energía ingresada; debido a la temperatura de salida de los gases es 579°C, y el porcentaje de exceso de aire que se presenta durante la combustión del gas natural, el cual se evaluó en 272,12%.

- ✚ El resultado general del diagnóstico de eficiencia energética al subsector industrial de fundición de metales ferrosos y no ferrosos en el Valle del Cauca y Cauca, permite concluir que la fuente general de pérdidas de energía en los

hornos son los gases de combustión; debido al calor sensible, calor latente de vaporización y presencia de inquemados en forma de monóxido de carbono. Por ello, se postularon propuestas que permitirían el aprovechamiento de esta energía residual, y después de la evaluación de los potenciales de ahorro energético, económicos, costos de inversión y tiempos de retorno de la inversión para la aplicación de estas alternativas, se consideran como las más factibles de implementación: el control de la relación aire-combustible, la recuperación de calor de los gases de combustión para el calentamiento del aire, los quemadores auto-regenerativos o auto-recuperativos, y la implementación de un Ciclo Rankine Orgánico para la generación de energía eléctrica.

El mayor potencial de ahorro energético se encontró para la propuesta del calentamiento del aire de combustión, con un 50,55%, con la cual se lograría un tiempo de retorno de la inversión aproximado de 0,75 años.

✚ La primera propuesta del programa de mejora de la energía térmica para el sector de fundición de metales ferrosos y no ferrosos es el control de la relación aire-combustible (CRAC), es una alternativa con la cual se logra un potencial de ahorro económico de \$2.436 COP/t de producto, y alcanza un tiempo de retorno de la inversión de 0,69 años. La segunda es la recuperación del calor de los gases de combustión para el calentamiento del aire de combustión (RCGCA), la cual logra un potencial de ahorro económico de \$31.554 COP/t de producto, con un tiempo de retorno de la inversión de 0,75 años. La tercera propuesta del programa es la implementación de quemadores auto-regenerativos o auto-recuperativos (QAR), con la cual se logra un tiempo de retorno de la inversión de 0,57 años y un potencial de ahorro económico de \$22.538 COP/t de producto.

La cuarta alternativa del programa de mejora de la energía térmica considerada entre las más factibles es la implementación de un Ciclo Rankine

Orgánico (ORC) para la generación de energía eléctrica con la cual se alcanza un potencial de ahorro de \$2.559 COP/t de producto, con un tiempo de retorno de la inversión de 8,19 años. Sin embargo, existen casos especiales como son Gerdau Diaco S.A y Sidoc S.A, donde el tiempo de retorno de la inversión es de 1,41 y 0,61 años, respectivamente.

✚ La implementación de la tecnología de oxidcombustión, a pesar que ha sido empleada en algunas de las empresas intervenidas durante el proyecto, y ser una tecnología capaz de lograr un potencial de ahorro energético del 31,84%, es una tecnología muy costosa, lo cual dificulta su implementación en la industria nacional.

✚ Los indicadores de consumo de energía térmica son una herramienta fundamental, y práctica para la evaluación de la eficiencia energética de los procesos realizados a nivel industrial. Sin embargo, en algunas industrias regionales no se han establecidos los parámetros y los métodos de medición necesarios para su elaboración.

El nivel de relación de los consumos energéticos con el nivel de producción de las empresas intervenidas se sostiene en un rango del 0,0001 al 0,5394; de acuerdo al análisis de los indicadores de consumo de energía térmica de la sección 6.4, dando evidencia del nivel de eficiencia energética del subsector industrial de metales ferrosos y no ferrosos en el Valle del Cauca y Cauca.

RECOMENDACIONES

De acuerdo al trabajo realizado en el diagnóstico de eficiencia energética al sector industrial de metales ferrosos y no ferrosos, se logran realizar las siguientes recomendaciones:

- ✚ La industria de fundición de metales debe implementar instrumentos de medición del consumos de sus energéticos por equipo, así como llevar el control de los niveles de producción de manera que se logre realizar un seguimiento continuo a los indicadores del proceso, con un nivel alto de confiabilidad en los resultados y se logren tomar acciones con el fin de mejorar los procesos productivos.
- ✚ Aunque el estudio realizado corresponde a un análisis de eficiencia energética en el sector industrial de fundición de metales ferrosos y no ferrosos en el Valle del Cauca y Cauca, y la formulación de un programa de mejora de la energía térmica; se recomienda realizar un estudio económico en mayor profundidad en donde se evalúe el impacto en los potenciales de ahorro al considerar indicadores como el costo de gas natural para los usuarios no regulados en las empresas correspondientes, así como el costo del suministro de oxígeno en la implementación de la alternativa de enriquecimiento del aire de combustión con oxígeno (EACOX) . También se deben incluir criterios para la evaluación de las propuestas del programa como son costos de mantenimiento, operación e indirectos.
- ✚ La generación de energía eléctrica por medio de un Ciclo Rankine Orgánico es una de las alternativas más factibles para su implementación en el sector industrial. Sin embargo, esta alternativa presenta una baja eficiencia energética, influyendo en el potencial de ahorro económico de \$ 2.559 COP/t de producto. Por lo tanto, se recomienda analizar otros ciclos orgánicos de

generación de energía a partir de fuentes de calor residual con los cuales se logre una mayor eficiencia, incrementando de esta forma el potencial de ahorro.

- ✚ La recuperación de calor para el precalentamiento de la materia prima (RCGCM), se encuentra entre las alternativas menos factibles de implementación, dado que el tiempo de retorno de la inversión que logra con esta alternativa es de 9,7 años, con un potencial de ahorro económico de \$7.078 COP/t de metal. El factor influyente en el potencial de ahorro alcanzado es la eficiencia del sistema de intercambio de calor sólido-gas del 35,00%, por lo que se recomienda analizar sistemas de recuperación en dichas condiciones con las cuales se logren mayores eficiencias en el sistema. Así como realizar estudios para la reducción del costo de la inversión.
- ✚ Aunque en este proyecto no se evaluó la propuesta de sustitución del combustible por un biocombustible, se recomienda realizar la evaluación técnica y económica al implementar esta propuesta al sector de fundiciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Amell, A., Francisco, A., & Muñoz, L. M. M. (2013). Horno de Crisol Autoregenerativo ., *Metal Actual*, 12–17.
- ANDI Cámara de Fedemetal, & DANE. (2009). LA CADENA DE VALOR SIDERÚRGICA Y METALMECÁNICA EN COLOMBIA.
- Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica. (2017). Indicadores de Generación. Retrieved from <http://www.acolgen.org.co>
- Boeckenhauer, K., & Kaczmarczyk, T. (2013). Modern Furnaces For Aluminum Scrap Recycling, (Photo 2), 1–8. Retrieved from <http://www.secowarwick.com/assets/Documents/Articles/Aluminium/MODERN-FURNACES-FOR-ALUMINUM-SCRAP-RECYCLING-AP.pdf>
- Bratu, V., Gaba, A., Stoian, E. V., & Anghelina, F. V. (2016). NATURAL GAS CONSUMPTION REDUCING IN ALUMINUM MELTING FURNACES BY HEAT RECOVERY OF FLUE, 11(11), 17–22.
- Chévez Aparicio, P., & Rodríguez Pineda, G. (2012). *Propuesta de alternativas de gestión de la escoria salina de la industria de aluminio en el salvador*.
- COLCIENCIAS. (2017). Las Empresas están pagando mas impuestos por no saber que es I+D+I. Retrieved from http://www.colciencias.gov.co/portafolio/innovacion/beneficios_tributarios/cuales-son
- Corcho Tróchez, G. (2014). Eliminación de salvaguardias al acero también afectará ganancias de chatarreros. Retrieved from http://www.larepublica.co/eliminaci%25C3%25B3n-de-salvaguardias-al-acero-tambi%25C3%25A9n-afectar%25C3%25A1-ganancias-de-chatarreros_107356
- Cuadrado Peña, I. G., Colorado Granda, A. F., Cobos Gómez, J. C., & Vásquez Rueda, J. C. (2015). Feasibility Analysis for the Application of an Organic Rankine Cycle in an Oilfield. *Revista EIA*, (23), 137–148. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372015000100013&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- DANE. (2007a). DISTRIBUCION PORCENTUAL DE LAS VARIABLES PRINCIPALES SEGUN

- GRUPOS INDUSTRIALES. Retrieved from <http://formularios.dane.gov.co/encuestas/eam/seleccion.htm?x=21&y=12>
- DANE. (2007b). Encuesta Anual Manufacturera “ Colombia variables principales según departamentos , Bogotá D.C y grupos industriales .”
- DIAN, D. de I. y A. N. (2012). Resolución número 000139 (nov. 21 de 2012), 139, 1–34.
- Direct Industry. (2017). Flameless burners. Retrieved from <http://pdf.directindustry.com/pdf/tab/flameless-burners.html>
- DML & Cía. Ltda. (2011). *Ingeniería Básica y Detallada de un Sistema de Extracción de Gases*.
- Eclipse Innovative Thermal Solutions. (2017). Product Guide, 6–7. Retrieved from http://pdf.directindustry.com/pdf/eclipse/eclipse-product-guide/21978-487955-_2.html
- Emison. (2000). Horno de Reverbero. Retrieved from <http://www.emison.com/hornos de reverbero.htm>
- Environmental Protection Agency. (1991). Metallurgical Industry “Secondary Aluminum Operations,” 86(1), 10–11. Retrieved from <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch12/final/c12s08.pdf>
- Gavigan, P. (2008). Linde and ArcelorMittal to Describe Benefits of Flameless Oxyfuel At AISTech. Retrieved from <http://www.businesswire.com/news/home/20080501005719/en/Linde-ArcelorMittal-Describe-Benefits-Flameless-Oxyfuel-AISTech>
- GHI- Hornos Industriales. (2016). Horno de Vigas Galopantes tipo VG. Retrieved from <http://www.ghihornos.com/Ferr.rollos.vigas.htm>
- IEA, I. E. A. (2007). Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions. *Energy Policy*, 30(10), 849–863. <http://doi.org/10.1787/9789264030404-en>
- INCOMBUSTIÓN-Red de Investigación e Innovación en Combustión Avanzada de Uso Industrial. (2014). *Determinación del potencial de reducción del consumo energético en los subsectores manufactureros código CIIU 10-18 en Colombia*.
- Industrial Efficiency Technology Database. (2012). Oxygen Level Control and VSDs on Combustion Fans. Retrieved from <http://ietd.iipnetwork.org/content/oxgen-level-control-and-vsds-combustion-fans>
- Institute for Industrial Productivity. (2010). Walking Beam Furnance. Retrieved from <http://ietd.iipnetwork.org/content/walking-beam-furnace-0>
- Institute for Industrial Productivity. (2012). Flameless Burners - Dilute Oxygen Combustion.

- International Standard Organization. (2009). *Norma ISO 13579: Industrial Furnaces and associated thermal processing equipment*.
- International Standard Organization. (2013). “Norma ISO 13579: Industrial Furnaces and associated thermal processing equipment.”
- John Zink Company. (2017). Industrial Boiler Burners. Retrieved from <http://www.coen.com/products/industrial-boiler-burners/>
- Karunakar, D. . (2015). Metal Casting. *The Effects of Brief Mindfulness Intervention on Acute Pain Experience: An Examination of Individual Difference*, 1, 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Laire, M. A. C. de E. E. (AChEE). (2013). Guía de Implementación de Sistema de Gestión de la ENERGÍA Basado en ISO50001, 53(9), 9–15. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Lazzarin, R. M., & Noro, M. (2015). Energy efficiency opportunities in the production process of cast iron foundries: An experience in Italy. *Applied Thermal Engineering*, 90, 509–520. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.028>
- Lopez, D. (2013). Uso de Ciclos Rankine Orgánicos Para Generación de Potencia Acoplados a Fuentes Renovables y Calor de Desecho. Retrieved from <http://latinoamericarenovable.com/2013/03/28/uso-de-ciclos-rankine-organicos-para-generacion-de-potencia-acoplados-a-fuentes-renovables-y-calor-de-desecho/>
- Luo, Z., & Soria, A. (2008). *Prospective study of the world aluminium industry. Joint Research Center Scientific and Technical Reports, Institute for Prospective Technological Studies, European Commission, EUR* (Vol. 22951). <http://doi.org/10.2791/36024>
- Manrique Moreno, J. V. (2015). TECNOLOGIA PARA RECUPERACION DE CALOR RESIDUAL EN ESTACIONES COMPRESORAS DE GAS NATURAL :, 40–50.
- Maya, C. (2010). Tratamientos térmicos de los aceros. *Metalografía*.
- Metallurgical Industry 12.12-1. (1991), 86, 10–11.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. República de Colombia. (2012). «PROYECTO DE EVALUACIÓN DE NECESIDADES TECNOLÓGICAS PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO».
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible República de Colombia. (2017). Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono.
- Ministerio de Comercio Industria y Turismo, & República de Colombia. (2016). Programa de

Transformación Productiva.

Ministerio de Minas y Energía de Colombia, & Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. (2017). Plan De Acción Indicativo De Eficiencia Energética 2017 - 2022, 157. Retrieved from http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf

Ministerio de Minas y Energía República de Colombia. (2016). Resolucion_41286_de_2016_PROURE.pdf.

Moya, J. A., Boulamati, A., Slingerland, S., Veen, R. Van Der, Gancheva, M., & Rademaekers, K. M. (2015). *Energy Efficiency and GHG Emissions : Prospective Scenarios for the Aluminium Industry Second Main Title Line Second Line Third Main Title Line Third Line*. <http://doi.org/10.2790/263787>

Nimbalkar, S., & Oak Ridge National Laboratory. (2015). Waste Heat Recovery from Industrial Process Heating Equipment.

Osaka Gas Co. Ltd. (2015). Regenerative burner system. Retrieved from https://www.osakagas.co.jp/en/rd/technical/1198856_6995.html

Remus, R., Roudier, S., Aguado Monsonet, M. a., & Sancho, L. D. (2013). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Vol. BREF-IS)*. <http://doi.org/10.2791/97469>

Ryabov, V. R., Foreign Technology Division, & Wright-patterson Air Force Base. (1973). Fusion welding of aluminum to steel, (July), 220.

Sánchez-Junco, L. (2012). Aplicación del ciclo orgánico de rankine para el aprovechamiento de calor residual en una refinería., 1–106.

Schifo, J., & Radia, J. (2004). Theoretical/Best Practice Energy Use In Metalcasting Operations. *US Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy*, 116. Retrieved from http://www.eere.energy.gov/manufacturing/industries_technologies/metalcasting/pdfs/doebestpractice_052804.pdf

Shires, G. L. (2006). Furnaces. *Book 2 - Energy Efficiency in Thermal Utilities*, F. <http://doi.org/10.1615/AtoZ.f.furnaces>

Thermotech Division of NACHI-FUJIKOSHI Corp. (2013). Thermotechnology general catalog. Retrieved from <https://www.nachi-fujikoshi.co.jp/eng/web/pdf/5001E.pdf>

Trianni, A., Cagno, E., Thollander, P., & Backlund, S. (2013). Barriers to industrial energy efficiency

- in foundries: A European comparison. *Journal of Cleaner Production*, 40, 161–176.
<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.040>
- U.S. Department of Energy. (2007). U . S . Energy Requirements for Aluminum Production, 150.
 Retrieved from http://www1.eere.energy.gov/industry/aluminum/pdfs/al_theoretical.pdf
- U.S. Department of Energy -Energy Efficiency and Renewable Energy, & ITP Metal Casting. (2005).
Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry. Retrieved from
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Advanced+Melting+Technologies+:+Energy+Saving+Concepts+and+Opportunities+for+the+Metal+Casting+Industry#0>
- U.S. Department of Energy Office of Industrial Technologies. (2000). Energy and Environmental Profile of the. *Office*, (May).
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2001). Determinación de la eficiencia energética del subsector industrial de hierro, acero y metales no ferrosos, 18.
- Unidad de Planeación Minero Energética., Prias Caicedo, O., & GIEN., G. de G. E. E. (2011). Herramientas Para el Análisis de Caracterización De La Eficiencia Energética.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2015). Plan Energético Nacional: Ideario Energético 2050.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)-Consorcio Bariloche (BRP). (2007). Consultoría para la Formulación Estratégica del Plan de Uso Racional de Energía y de Fuentes no Convencionales de Energía.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2012). Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions From the Iron and Steel Industry, (September), 21.
 Retrieved from <http://www.epa.gov/nsr/ghgdocs/ironsteel.pdf>
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2008). Métodos de Fundición o Colada.
- UTC Power. (2004). Turn Waste Heat into Electricity - with Zero Emissions . PureCycle TM Systems Feature :
- Wei, W. (2013). Energy Consumption and Carbon Footprint of Secondary Aluminum Cast House Master Thesis Wenjing Wei Department of Materials Science and Engineering Division of Energy and Furnace Technology Royal Institute of Technology SE-100 44 Stockholm , Sweden.
- Worrell, E., Price, L., Neelis, M., Galitsky, C., & Nan, Z. (2008). World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors, (February), 51.

Wu, N. P., Biteau, H., & Utiskul, Y. P. (2012). Combustion Air Requirements for Power Burner Appliances Final Report Prepared by :, (January 30).

WUHAN HANKOU FURNACE Co., L. (2015). Car bottom gas fired furnace.

Anexo 1 “Hornos de Combustión para la Fundición de Metales No Ferrosos”

Existen diferentes tipos de hornos para la fundición de metales no ferrosos, en función del volumen de producción, calidad del material a fundir y el tipo de tecnología de combustión empleado. A continuación se mencionan algunos hornos.

1. Horno crisol

El horno crisol consta de un crisol de grafito, carburo de silicio, arcilla y otras sustancias, provistos de tapa para cierre hermético; alrededor del crisol en la parte exterior, se encuentra un espacio anular donde se ubican los quemadores del combustible y se genera la llama de la combustión. Generalmente emplean gas natural como combustible, sin embargo en algunas ocasiones se emplea diésel o petróleo. El gas y el aire pasan a través del quemador, se queman y posteriormente las llamas pasan a través del crisol. En el interior del crisol se encuentra la carga de metales para ser fundida. Este sistema permite que no choquen directamente la llama en el metal, y las pérdidas de calor al exterior están limitadas por el refractario de las paredes (U.S. Department of Energy -Energy Efficiency and Renewable Energy & ITP Metal Casting, 2005) (Karunakar, 2015).

Los hornos crisol se construyen fijos, donde el material se extrae con una cuchara, pero también se construyen hornos crisol basculantes, en los que resulta más cómoda la colada. Entre las ventajas de este tipo de hornos están las bajas pérdidas de metal fundido y calentamiento uniforme de la carga (Karunakar, 2015). Sin embargo, los hornos de crisol se emplean para fundiciones con un rango de capacidad de 160 a 4.500 Kg, por lo cual son más comunes en las pequeñas y medianas empresas de fundición (U.S. Department of Energy, 2007). La eficiencia energética de los hornos crisol es baja, se encuentra en un rango entre el 7% y el 19%, y una pérdida del metal fundido de 3,5%. El consumo específico promedio del horno crisol en la fundición de

aluminio es de 11,05 GJ/t, en un rango de 5,82 GJ/t a 16,28 GJ/t (Schifo & Radia, 2004).

Actualmente se han desarrollado algunas modificaciones a esta clase de hornos para volverlos más eficientes, desarrollando los hornos crisol auto-regenerativos.

1.1. Horno de crisol auto-regenerativo

El horno de crisol auto regenerativo CRISOREG-AL200, cuenta un crisol convencional, un quemador auto regenerativo, una chimenea, un sistema de control y de seguridad de llama. El quemador tiene dos zonas de combustión ubicadas a lado y lado del crisol, dichas zonas funcionan por ciclos, en un ciclo uno de las zonas trabaja en modo combustión y la otra en modo regeneración. Esto es muy importante, ya que la regeneración contribuye a la recuperación de calor empleando un material sólido (matriz cerámica) que absorbe el calor residual de los gases de combustión, y en el siguiente ciclo se transfiere el calor almacenado por dicho material al aire de combustión y así pre-calentarlo. Cabe aclarar que el sistema de recuperación de calor está insertado en el propio quemador, logrando de esta forma incrementar la eficiencia del horno, y ahorros en el consumo de combustible que pueden oscilar entre el 40% y 55%. En el sistema de recuperación de calor se logran temperaturas del aire de combustión superior a los 900°C, con una temperatura de salida de los gases de combustión entre 60 y 120 ° C. La temperatura de este equipo se encuentra entre 70 y 100°C (Amell, Francisco, & Muñoz, 2013). En la Figura 25 se muestra un horno crisol auto-regenerativo construido en la Universidad de Antioquia.

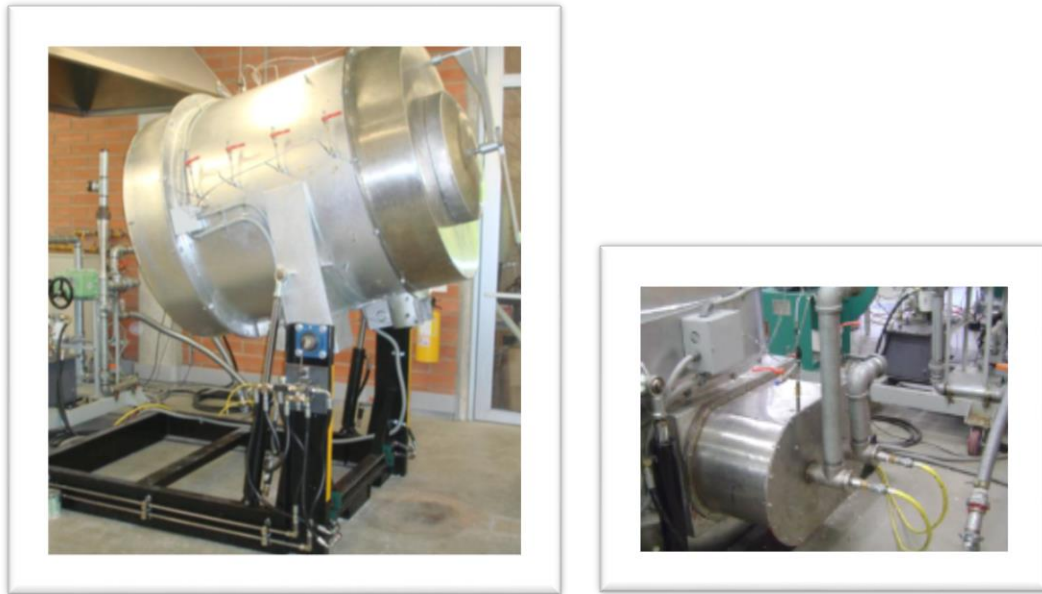


Figura 25. Horno crisol con quemadores auto-regenerativos (Amell et al., 2013).

2. Horno Reverbero

Los hornos reverberos son empleados generalmente en los procesos de fundición de aluminio. En los Estados Unidos, el 90% de la producción de aluminio se realiza en hornos tipo reverberos, el resto corresponde equitativamente a los hornos tipo pila y hornos de inducción (Schifo & Radia, 2004).

Los hornos reverberos vienen en una variedad de configuraciones, sin embargo los más conocidos son las estructuras rectangulares o circulares, y se emplea para la fundición de metales como el cobre, latón, bronce y el aluminio. El combustible empleado puede ser gas natural, petróleo o carbón pulverizado. En uno de los extremos del horno se localiza el hogar, donde se quema el combustible y en el extremo opuesto esta la chimenea. Los quemadores son colocados sobre las paredes laterales del horno para proporcionar calor por encima del hogar del horno. La carga se calienta por dos modos de transferencia de calor; por radiación térmica proveniente

de la llama de combustión y de las paredes del horno, y por medio de convección de los gases de combustión con la superficie de aluminio fundido. Las variaciones de los hornos reverberos se relacionan a la forma de descarga de la fundición: estacionario o de inclinación. La forma de carga del material: carga frontal o superior.

Una de las ventajas de este tipo de hornos es la alta velocidad de producción, pues se encuentran en capacidades superiores a las 130 toneladas (Schifo & Radia, 2004), además tienen bajos costos de mantenimiento. Sin embargo, presenta algunas desventajas, entre ellas se menciona que requieren de grandes espacios, y tienen bajas eficiencias térmicas, entre el 20 al 25%, que puede ser aumentada en un 15% aproximadamente por la recuperación de calor (U.S. Department of Energy -Energy Efficiency and Renewable Energy & ITP Metal Casting, 2005). Adicionalmente, presentan una alta velocidad de oxidación, debido a que los gases de combustión entran en contacto directo con el metal fundido, ocasionando la formación de escoria, y una pérdida de masa fundida entre el 3 a 5% (U.S. Department of Energy -Energy Efficiency and Renewable Energy & ITP Metal Casting, 2005)(Schifo & Radia, 2004). Las mayores pérdidas de energía se dan por los gases de combustión calientes.

El consumo específico promedio de energía térmica en un horno reverbero es de 3,14 GJ/t, con un rango entre 2,79 GJ/t a 3,49 GJ/t; cabe aclarar que estos indicadores corresponden a hornos reverberos húmedos, es decir que realizan la carga de la materia prima sobre el aluminio fundido (Schifo & Radia, 2004). En hornos reverberos con quemadores regenerativos, y sistema de control de la combustión se tienen consumos específicos de 2,5 GJ/ t (Worrell et al., 2008). Y en hornos reverberos que emplean chatarra vieja como materia prima se conoce un consumo específico de 3,8 GJ/t (Moya et al., 2015).

En la Figura 26 se muestra un esquema de un horno reverbero.

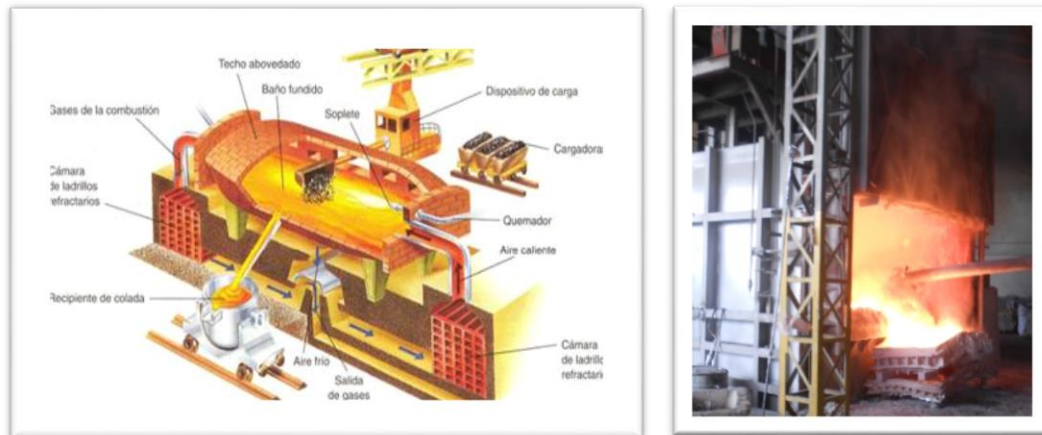


Figura 26. Horno reverbero para la fundición de aluminio (Emison, 2000).

2.1. Horno Stack

El horno Stack es una modificación al horno reverbero, con un sistema de recuperación de calor de los gases de combustión para precalentar el material que ingresa al horno, lo que permite incrementar la eficiencia del proceso; logrando eficiencias entre el 40 al 50%. Los gases calientes se hacen pasar a través de un eje por donde fluye la carga a precalentar, y posteriormente ingresa dentro del hogar, ver Figura 27 (U.S. Department of Energy -Energy Efficiency and Renewable Energy & ITP Metal Casting, 2005).

El ingreso de la carga caliente en el horno permite disminuir la exposición de esta con oxígeno mientras es calentada, reduciendo la formación de escoria a un 1,25% (Schifo & Radia, 2004). Adicionalmente, la carga se expone a gases calientes con un bajo contenido de oxígeno, ya que el proceso de combustión tiene lugar sobre el baño fundido.

El consumo específico del horno está en 2,00 GJ/t (Schifo & Radia, 2004).

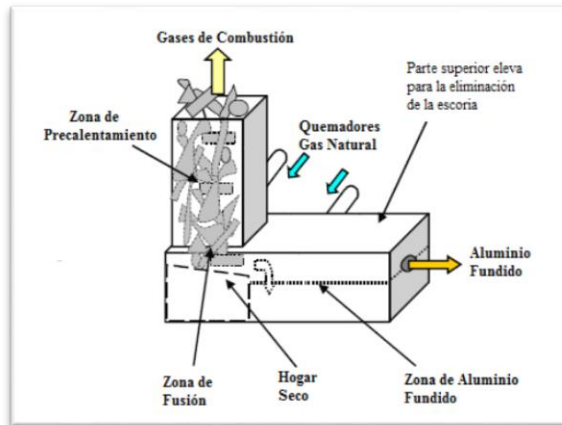


Figura 27. Horno Stack (Schifo & Radia, 2004)

3. Horno rotatorio

Los hornos rotativos están formados por una envoltura cilíndrica de acero de eje horizontal, que termina con dos estructuras, una en cada extremo. En uno de los extremos está situado el quemador y en el otro la salida de los gases quemados, que generalmente pasan por un sistema de recuperación de calor para precalentar el aire de soplado antes de ser evacuados por la chimenea. Todo el interior del horno está revestido con un material refractario. El combustible puede ser gas natural, gasoil o carbón pulverizado. Este tipo de horno se emplea en la fundición de toda clase de metales y aleaciones, como cobre, bronce, latón, aluminio, aceros, la incineración y calcinación. El material se funde por la transferencia de calor en la bóveda caliente, el contacto con los gases y la llama, así como el contacto directo con la parte superior del horno, que al girar queda bajo la carga. Con esto se reduce el tiempo de fusión y se logra evitar el efecto aislante de la capa de escorias, que se forma en la parte superior del baño, que en los hornos reverberos dificultan el calentamiento del metal.

Los hornos rotatorios son más eficientes que un horno reverbero, pues estos operan en un rango de eficiencia del 20% al 45% (U.S. Department of Energy, 2007). Sin

embargo, la capacidad de producción de un horno rotatorio está limitada en un rango de 5,60 a 8,96 toneladas. Mientras una empresa grande en Colombia posee hornos con capacidades superiores a las 16,00 toneladas. El consumo específico de energía térmica del horno rotatorio se encuentra entre 4,50 GJ/t a 7,10 GJ/t (Worrell et al., 2008).

Los hornos rotatorios de nueva generación, son totalmente automatizados, e incluyen un mecanismo de inclinación, el cual minimiza el tiempo de carga, eliminación de escoria y limpieza (U.S. Department of Energy -Energy Efficiency and Renewable Energy & ITP Metal Casting, 2005), logran una mayor velocidad de fundición, reduce las emisiones, y logran una composición del metal consistente. Otras de las ventajas mencionadas en este tipo de hornos es que se requiere un espacio mínimo, facilidad de operación, y simplicidad del mantenimiento (Karunakar, 2015) (Environmental Protection Agency, 1991).

El diseño adecuado de puertas, y sistemas de control de temperatura, parámetros de rotación, monitoreo de las emisiones de gases, y la implementación de sistemas de oxicomcombustión, incrementan la productividad de un horno rotatorio en un 15% mejorando adicionalmente las pérdidas por radiación, y el control del oxígeno libre desde las infiltraciones de aire. De esta manera se incrementa la eficiencia de la combustión por encima de un 20% (U.S. Department of Energy -Energy Efficiency and Renewable Energy & ITP Metal Casting, 2005). En la Figura 28 se muestran un horno rotatorio durante el proceso de fundición (derecha) y durante el periodo de inclinación para la colada (izquierda).



Figura 28. Horno rotatorio (Boeckenhauer & Kaczmarczyk, 2013)

Anexo 2 “Hornos de Calentamiento de Palanquilla”

Los hornos para el calentamiento de palanquilla se clasifican de acuerdo al método empleado para el transporte de la carga, entre ellos se conocen los hornos de empuje y los hornos de vigas caminantes.

1. Horno de empuje para el calentamiento de acero

Los hornos de recalentamiento tienen la función de incrementar la temperatura de la pieza de acero entre los 900°C a 1250°C, hasta que la pieza sea suficientemente plástica para ser prensada o enrollada hasta alcanzar el tamaño o forma deseada. El material recupera parte del calor de los gases de combustión en el movimiento a lo largo del horno. El calor absorbido por el material en el horno es estable y uniforme a través de la sección transversal del mismo (Shires, 2006).

Los hornos para el calentamiento de palanquilla están conformados por una cámara refractaria construida de materiales aislantes para retener el calor en la parte alta a la temperatura de funcionamiento, un hogar para sostener o transportar el acero; el cual consiste en una disposición de soportes metálicos que pueden ser refrigerados por agua, y los quemadores que usan combustibles líquidos o gaseosos. Los hornos están formados por tres zonas de combustión conocidas como zona de precalentamiento, calentamiento e igualación. Los quemadores son distribuidos a lo largo de estas tres zonas.

El calor es transferido al acero por radiación desde la llama, los productos de combustión calientes y las paredes del horno. Y el segundo fenómeno de transferencia de calor es por convección debido al movimiento de los gases calientes

sobre la superficie del material. El horno se clasifica como tipo empuje debido al método empleado para el transporte del material en el horno. El consumo específico de los hornos de empuje empleando recuperadores de calor, quemadores de bajo NOx, y sistemas de control para administrar la velocidad de combustión se encuentra en 1,5 GJ/ tonelada(United States Environmental Protection Agency (EPA), 2012). Entre las desventajas que presentan este tipo de horno está el daño frecuente del hogar del horno, y marcas del desplazamiento en el material (Shires, 2006).

En la Figura 29 se muestra un esquema y la puerta de ingreso del horno de empuje para el calentamiento de palanquilla.



Figura 29. Hornos de empuje para calentamiento de palanquilla:

2. Hornos de vigas caminantes (Walking Beam Furnace)

Los hornos de vigas caminantes, son hornos continuos diseñados para el calentamiento de piezas largas a altas temperaturas, aunque también pueden tratarse piezas en contenedores.

El movimiento alternativo de elevación, avance, descenso y retorno de vigas de material refractario dispuestas en ranuras de la solera del horno hace avanzar las

cargas a lo largo de su interior. Existen distintos dispositivos de entrada y salida de las piezas en el horno para integración en las líneas de producción. El tiempo de permanencia de las piezas en el interior de la cámara se regula en función de la frecuencia de accionamiento de las vigas (GHI- Hornos Industriales, 2016) .

Según un reporte de la Industrial Efficiency Technology database, este tipo de hornos corresponde a la tecnología de punta o más actualizada en hornos de recalentamiento, como muestra de ello en una planta de Estados Unidos, el reemplazo de tres hornos de empuje por uno de vigas caminantes significó una reducción en el consumo de energía del 25%, y ahorro de combustible del 37,5% (Institute for Industrial Productivity, 2010). En el contexto internacional, se han reportado consumos específicos de combustible de 1,16 GJ/t para el recalentamiento de palanquilla en hornos de vigas caminantes, con quemadores eficientes, sistemas de control y motores de eficiencia premium (Worrell et al., 2008).

En la Figura 30 se muestra el horno para el calentamiento de palanquilla tipo vigas caminantes.



Figura 30. Hornos de de vigas caminantes para calentamiento de palanquilla:

Anexo 3. “Hornos para Tratamientos Térmicos”

En el sector metalmecánico, en lo que corresponde a los tratamientos térmicos, existen diversas tecnologías de nueva generación y alta eficiencia energética. Las tecnologías desarrolladas tienen en cuenta los factores más relevantes del proceso como son: el control de temperatura, el sostenimiento de la temperatura en un periodo de tiempo, las condiciones de la atmósfera y el recalentamiento después de un periodo inicial de refrigeración. Entre las tecnologías desarrolladas están:

1. Horno de cámara

El horno de cámara dispone de una puerta tipo guillotina, para carga y descarga de los lotes. La puerta posee un sistema de elevación con accionamiento hidráulico o electromecánico, y un sistema opcional de apriete para mejorar su sellado térmico contra el marco frontal de la cámara del horno, ver Figura 31. Las piezas a tratar, colocadas sobre parrillas o dentro de cestas, se introducen dentro del horno mediante una máquina de carga que las deposita sobre los apoyos interiores del horno, contruidos en base a piezas preconformadas en hormigón refractario, o bien, en acero refractario de alta calidad según el tipo de aplicación.



Figura 31. Horno de cámara con puerta tipo guillotina.

El revestimiento térmico del horno es fibra cerámica prensada en bóveda, paredes laterales y puerta, y hormigón refractario y ladrillo aislante en solera según zonas. El sistema de calentamiento de los hornos de cámara pueden ser quemadores de gas de tipo convencional con control de combustión o resistencias eléctricas tipo pletina o hilo.

Los hornos tipo caja poseen un rango de temperaturas de operación de 500°C - 1200°C, en función de la potencia de los quemadores y el tipo de tratamiento térmico realizado. La capacidad de tratamiento de los hornos es de 150-500 Kg/h (Thermotech Division of NACHI-FUJIKOSHI Corp, 2013)

2. Hornos de carro o solera móvil

En los hornos de solera móvil o carro, las piezas a tratar se introducen dentro del horno mediante el carro portacarga autopropulsado electromecánicamente, que actúa a modo de solera móvil del propio horno, ver Figura 32. Dichas piezas se colocan sobre la propia solera del carro, o bien sobre los apoyos del mismo contruidos en base a piezas preconformadas en hormigón refractario, o bien, en acero refractario de

alta calidad según el tipo de aplicación. Los hornos de solera móvil son totalmente automáticos y programables en función del ciclo de temperatura y tiempo requerido, con finales de carrera, enclavamientos y sistemas de seguridad.

El revestimiento térmico del horno es fibra cerámica prensada en bóveda, paredes laterales y puerta, y hormigón refractario y ladrillo aislante en solera según zonas. El sistema de calentamiento de los hornos de cámara pueden ser quemadores de gas de tipo convencional con control de combustión o resistencias eléctricas tipo pletina o hilo.

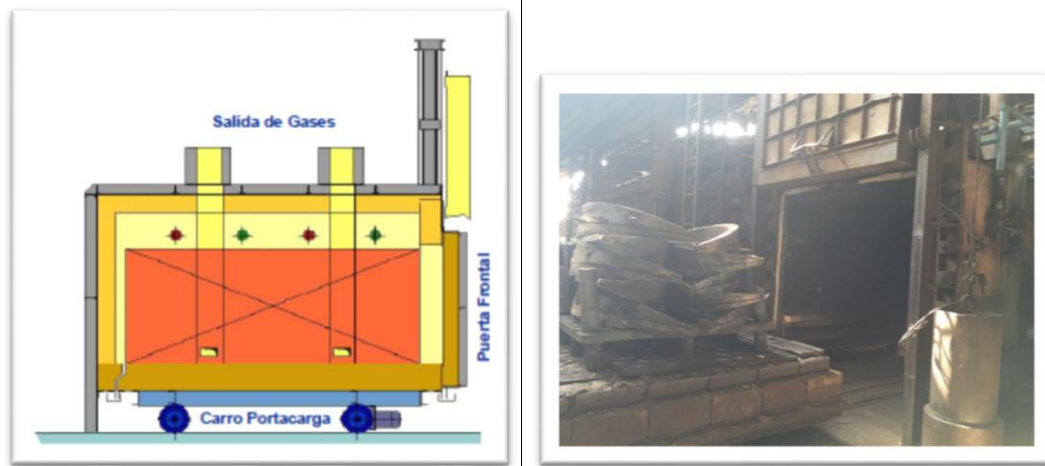


Figura 32. Secciones longitudinal y frontal de un horno de solera móvil.

Los hornos de solera móvil permiten hacer tratamientos hasta temperaturas de 1.350 °C aproximadamente. La temperatura de salida de los gases de combustión es menor a los 400°C. El máximo consumo de gas natural es del 128 m³/h, sin embargo estos consumos son variables en función de las dimensiones, y el peso de la pieza, además del tipo de tratamiento realizado (WUHAN HANKOU FURNACE Co., 2015).

3. Horno de recirculación

Los hornos de recirculación disponen de un diseño constructivo y dimensional en función de las características particulares de la carga, así como en cumplimiento con los requerimientos técnicos de proceso según la normativa aplicable. Los hornos de recirculación ofrecen una excelente uniformidad de la temperatura durante el ciclo de calentamiento de la carga, debido fundamentalmente al control de temperatura y circulación interna del flujo de aire caliente, ver Figura 33. La temperatura de proceso máxima para este tipo de hornos es de 750 °C. La recirculación se logra mediante ventiladores centrífugos; observar en la Figura 33, los cuales tienen un flujo vertical, transversal o longitudinal.



Figura 33. Horno de recirculación tipo carro con puerta frontal de guillotina.

A nivel internacional el mejor indicador del consumo específico en un proceso de recocido tipo batch es de 1,2 GJ/t; mientras en el proceso continuo se tiene un consumo específico de 1,1 GJ/t, Considerando la tecnología de recocido continuo el estado del arte de la tecnología y la mejor práctica tecnológica.

Anexo 4. “Balances de masa en la fundición de aluminio en Alumina S. A y Propulsora S. A”

Los balances de masa que permiten conocer las cantidades de las especies reactivas y los productos en la combustión del gas natural durante el proceso de fundición de aluminio se presentan de la Tabla 26 a la Tabla 29. Se evidencia la presencia de monóxido de nitrógeno como producto de la reacción debido a que como el proceso es considerado de alta temperatura, el nitrógeno que ingresa con el aire deja de ser un gas inerte y reacciona con oxígeno.

Tabla 26. Balance de masa del horno de fundición de aluminio H610 en Alumina S. A

Compuesto	Formula química	Entrada [Kg/t]	Genera [Kg/t]	Consume [Kg/t]	Salida [Kg/t]
Gas Natural	-	37,06	0,00	37,06	0,00
Oxígeno	O ₂	158,72	0,00	143,54	15,18
Monóxido de carbono	CO	0,00	1,03	0,00	1,03
Dióxido de Carbono	CO ₂	4.321,10	101,23	1,68	101,23
Agua	H ₂ O	11,58	78,07	0,00	89,65
Nitrógeno	N ₂	522,76	0,00	0,30	522,46
Monóxido de nitrógeno	NO	0,00	0,02	0,00	0,02
Dióxido de azufre	SO ₂	0,00	0,26	0,00	0,26
Total		5.051,22	180,36	182,59	729,58

Tabla 27. Balance de masa del horno de fundición de aluminio H612 en Alumina S. A

Compuesto	Formula química	Entrada [Kg/t]	Genera (Kg/t)	Consume (Kg/t)	Salida [Kg/t]
Gas Natural	-	50,36	0,00	50,36	0,00
Oxígeno	O ₂	223,31	0,00	194,79	28,52
Monóxido de carbono	CO	0,00	1,82	0,00	1,82
Dióxido de Carbono	CO ₂	2,29	136,89	2,29	136,89
Agua	H ₂ O	16,29	106,08	0,00	122,37
Nitrógeno	N ₂	735,49	0,00	0,41	735,08
Monóxido de nitrógeno	NO	0,00	0,02	0,00	0,02
Dióxido de azufre	SO ₂	0,00	0,57	0,00	0,57
Total		1.027,74	244,81	247,85	1.024,71

Tabla 28. Balance de masa del horno de fundición de aluminio H1070 en Alumina S. A

Compuesto	Formula química	Entrada [Kg/t]	Genera (Kg/t)	Consume (Kg/t)	Salida [Kg/t]
Gas Natural	-	14,87	0,00	14,87	0,00
Oxígeno	O ₂	59,43	0,00	57,82	1,61
Monóxido de carbono	CO	0,00	0,00	0,00	0,00
Dióxido de Carbono	CO ₂	0,68	41,26	0,68	41,26
Agua	H ₂ O	1,01	31,32	0,00	32,33
Nitrógeno	N ₂	0,12	0,00	0,12	0,00
Monóxido de nitrógeno	NO	0,00	0,01	0,00	0,01
Dióxido de azufre	SO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00
Total		76,10	72,59	73,48	75,21

Tabla 29. Balance de masa del horno de fundición de aluminio H6 en Propulsora S. A

Compuesto	Formula química	Entrada [Kg/t]	Genera (Kg/t)	Consume (Kg/t)	Salida [Kg/t]
Gas Natural	-	91,11	0,00	91,11	0,00
Oxígeno	O ₂	1.040,33	0,00	524,85	515,49
Monóxido de carbono	CO	0,00	0,01	0,00	0,01
Dióxido de Carbono	CO ₂	4,11	252,84	4,11	252,84
Agua	H ₂ O	66,97	383,88	0,00	450,85
Nitrógeno	N ₂	3.425,26	0,00	0,72	3.424,53
Monóxido de nitrógeno	NO	0,00	0,14	0,00	0,14
Dióxido de azufre	SO ₂	0,00	0,01	0,00	0,01
Total		4.627,78	636,87	620,79	4.643,86

Anexo 5. “Balances de masa en el calentamiento de palanquilla en Gerdau Diaco S. A y Sidoc S. A”

Los balances de masa que permiten conocer las cantidades de las especies reactivas y los productos en la combustión del gas natural durante el proceso de calentamiento de palanquilla se presentan en la Tabla 30 y Tabla 31. Se evidencia la presencia de monóxido de nitrógeno como producto de la reacción debido a que como el proceso es considerado de alta temperatura, el nitrógeno que ingresa con el aire deja de ser un gas inerte y reacciona con oxígeno.

Tabla 30. Balance de masa del horno de calentamiento de palanquilla Horno 2 de Sidoc S. A

Compuesto	Formula química	Entrada [Kg/t]	Genera [Kg/t]	Consume [Kg/t]	Salida [Kg/t]
Gas Natural	--	33,73	0,00	33,73	0,00
Dióxido de carbono	CO ₂	0,00	88,83	0,00	88,83
Agua	H ₂ O	14,43	67,44	0,00	81,87
Dióxido de azufre	SO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00
Monóxido de carbono	CO	0,00	0,00	0,00	0,00
Monóxido de nitrógeno	NO	0,00	0,01	0,00	0,01
Nitrógeno	N ₂	691,96	0,00	0,00	691,95
Oxígeno	O ₂	210,21	0,00	124,48	85,73
Total		950,32	156,27	158,21	948,39

Tabla 31. Balance de masa del horno de calentamiento de palanquilla Horno Bendotti en Gerdau Diaco S. A

Compuesto	Formula química	Entrada [Kg/t]	Genera [Kg/t]	Consume [Kg/t]	Salida [Kg/t]
Gas Natural	--	28,01	0,00	28,01	0,00
Dióxido de carbono	CO ₂	0,00	73,80	0,00	73,80
Agua	H ₂ O	0,02	112,14	0,00	112,15
Dióxido de azufre	SO ₂	0,00	0,01	0,00	0,01
Monóxido de carbono	CO	0,00	0,05	0,00	0,05
Monóxido de nitrógeno	NO	0,00	0,06	0,00	0,06
Nitrógeno	N ₂	788,77	0,00	0,02	788,75
Oxígeno	O ₂	239,62	0,00	153,32	86,30
Total		1.056,42	186,06	181,35	1.061,13

Anexo 6. “Balances de masa en el tratamiento térmico de revenido en el horno 1 de Fundiciones Universo S. A”

Los balances de masa que permiten conocer las cantidades de las especies reactivas y los productos en la combustión del gas natural durante el tratamiento térmico de revenido en el horno 1 se presentan en la Tabla 32. se evidencia la presencia de monóxido de nitrógeno como producto de la reacción debido a que como el proceso es considerado de alta temperatura, el nitrógeno que ingresa con el aire deja de ser un gas inerte y reacciona con oxígeno.

Tabla 32. Balance de masa del horno de tratamiento térmico horno #1 en Fundiciones Universo S. A

Compuesto	Formula química	Entrada [Kg/t]	Genera [Kg/t]	Consume [Kg/t]	Salida [Kg/t]
Gas Natural	-	39,64	0,00	39,64	0,00
Oxígeno	O ₂	135,43	0,00	36,40	99,03
Monóxido de carbono	CO	0,00	0,01	0,00	0,01
Dióxido de Carbono	CO ₂	1,74	25,96	0,00	27,69
Agua	H ₂ O	9,30	19,71	0,00	29,01
Nitrógeno	N ₂	445,80	0,00	0,01	445,79
Monóxido de nitrógeno	NO	0,00	0,01	0,00	0,01
Dióxido de azufre	SO ₂	0,00	0,02	0,00	0,02
Total		631,90	45,69	76,05	601,54

Anexo 7. “Costos de los quemadores auto-regenerativos o auto-recuperativos”



Eclipse Inc
1665 Elmwood Road
Rockford IL 61103-1299
United States

Phone: 815 877 3031
<http://www.eclipsenet.com>

Quote
10Q0303790

Quotation Date: 01 May 2017
Opportunity No.: OPP100008018

Quote To:

DML & CIA Ltda
Av 2Bis Norte # 31-121
Valle Del Cauca, Cali
191507
Colombia

Salesperson:

Attention:

Miguel Murillo
Phone: 57 2 6612408
miguel.murillo@dmcia.com.co

Customer ID:	Payment Terms:	Shipment:	Shipping Terms:
	Cash With Order	18 Weeks Purchase Order Acceptance	Ex Works
Terms of Sale:	Valid Through:	Created By:	
See Attached	24 May 2017	Glorivy Hobson	

Notes:

At 480C / 900F and 1000m / 3300ft elevation the burner will operate at approximately 45mbar / 18 in.w.c. burner inlet air pressure

Payment Terms:
50% Due With Purchase Order
50% Due 10 Days Prior To Shipment

\$150.00 minimum bill

Terms of this quote are subject to progress payments and credit approval

- Please reference the Eclipse Inc Quote Number when placing your order -

We are now accepting registrations for our next Industrial Combustion Workshop, May 16-18, 2017. Visit <http://www.eclipsenet.com/services> for more information, or call (815) 637-7335.

Item	Part Number - Description	Quantity	UOM	Net Price	Ext Price
1	BB20.C-083NLOS0P3A0G0PG CRU	18		13,132.00	236,376.00
	Burner, Beta, Combination Oil and Gas, Size 8, 3000 Series, Light Oil, Configured Product, v2.0 Customer: # - Standard Product Options Model: C - Combination Oil and Gas ModelType: 08 - Size 8 Series: 3 - 3000 Series - Refractory Baffle w/ Insulation Piping: N - NPT FuelType: LO - Light Oil CombAirInlet: S0 - 12:00 Combustion/Secondary Air Inlet PilotObsport: P3 - 3:00 Scanner/Pilot/Port AtomizingAirInlet: A0 - 12:00 Atomizing/Primary Air Inlet GasInlet: G0 - 12:00 Gas Inlet Ignition: PG - IPG Pilot Combustor: CR - Converging Refractory FlameSupervision: U - UV Adapter Assembly				



Eclipse Inc
1665 Elmwood Road
Rockford IL 61103-1299
United States

Phone: 815 877 3031
<http://www.eclipsenet.com>

Quote

10Q0303790

Quotation Date: 01 May 2017

Opportunity No.: OPP100008018

<u>Item</u>	<u>Part Number - Description</u>	<u>Quantity</u>	<u>UOM</u>	<u>Net Price</u>	<u>Ext Price</u>
				Line Total:	236,376.00
				Total:	236,376.00 USD

ESSEN

Nit. 890.306.166-8
Calle 34 No. 8-43 Cali - Colombia

PBX: 485 3100 Fax 443 7936 Servicio al Cliente: 4853105 Fax 443 5543
e-mail: essen@essen.com.co

CERTIFICADOS CON CCAA

COTIZACION No. 56079

Fecha 27/03/2017
Valida hasta 27/03/2017

Pag. No 1

Señor(es) **HECTOR ASTUDILLO**

Attn:

Direccion Calle 34 No 8-43

Ciudad CALI

Tel.: 0

e-mail:

Forma de Pago

CONTADO VENTAS

Producto	Cant.	Precio Und	IVA	Subtotal	Total
QUEMADOR A GAS NATURAL P BURNER, 110V/180HZ, 200,000-400,000 BTU,MOD.HSG-400 (I)	1 OFERTA POR UN	2.246.000	426.740	2.672.740	2.672.740



Modelo HSG-400

Marca Wayne
Combustible Gas Natural

Potencia
Min 200.000
Btu

Max 400.000
Btu

Potencias de 200.000 y 400.000 Btu/hr, con sólo
un cambio en la boquilla.

Mayor presión estática de aire que
los quemadores estándar de gas.

Puede trabajar en variadas cámaras
de combustión por el diseño del
combustor para retener la flama.

**GARANTIA
3 MESES**

FAVOR CONSIGNAR a nombre de ESSEN SAS en BANCO DE OCCIDENTE Cta. Cte No. 022 041966 / DAVIVIENDA Cta. Cte No. 0152
6999 6282

SUBTOTAL	2.246.000
DESCUENTO	0
Valor con DCTO	2.246.000
IVA	426.740
TOTAL A PAGAR	2.672.740

CONDICIONES COMERCIALES

1. VALIDEZ DE LA OFERTA: Dado que los precios están dados en USD por la TRM del día, estos están sujetos a cambios sin previo aviso.
2. FLETES: Los fletes y seguros son a cargo y bajo responsabilidad del cliente. El despacho se realizará por la transportadora que el cliente indique.
3. CALIDAD: Todos nuestros equipos son de uso comercial y NO industrial, se entregan previamente ensayados y certificados por nuestro departamento de control de calidad.
4. GARANTIA: IMPORTANTE. NUESTRA GARANTIA CUBRE DEFECTOS DE FABRICACION EN CONDICIONES NORMALES DE USO.
El tiempo de garantía es la estipulada en esta cotización y en la tarjeta de garantía de cada equipo. Esta corre a partir de la fecha de entrega y se prestará únicamente en la CI 34 # 8-43. El Técnico Cali - Valle.
La garantía se invalida por las siguientes situaciones:
a) El producto desarmado y/o reparado por personal no autorizado.
b) Uso de un voltaje diferente al de su funcionamiento normal establecido en el Manual, empaque y/o especificaciones del producto.
c) Cuando la falla es originada por el mal uso, maltrato, malinstalación defectuosa, impericia o imprudencia del usuario, condiciones físicas no aptas para el funcionamiento del equipo.
d) Piezas rotas y quemadas así como aquellas que se desgastan por el uso irregular del producto que NO ESTEN PROTEGIDAS POR LA GARANTIA.
5. REEMPLAZOS: Con repuestos de repuestos originales. NUESTRA GARANTIA NO CUBRE DAÑOS A PARTES ELECTRICAS O ELECTRONICAS.
6. Los valores cotizados de los equipos no incluyen el valor de la instalación, ni de los elementos adicionales que se requieran para la misma.
7. La empresa no devuelve dinero por una compra equivocada del cliente.
(Es un placer brindar un buen servicio para Usted! ¡Contamos en espera de su amable respuesta!

ESPINOSA ARBOLEDA FIANOR

Celular 3136721948

Correo

Autorizada por HECTOR ASTUDILLO