

OPTIMIZACIÓN EN HORNOS DE FUNDICIÓN EN INDUSTRIA DE ALUMINIO

Fecha enviada: 7 enero 2023

Fecha corregida: 27 marzo 2023

Mario Santizo, PhD, MEng¹

RESUMEN

La investigación corresponde a la optimización del área de fundición en una fábrica de productos de aluminio.

Para identificar los proyectos de ahorro energético en el área de fundición de la empresa, fue preciso establecer donde y como es utilizada la energía, utilizando la factura de combustóleos durante un año de operación y tomando mediciones con los siguientes equipos:

1. Analizador de energía eléctrica marca Chauvin Arnoux.
2. Medidor de gases de combustión marca Bacharach.
3. Medidor de temperatura por infrarrojo marca Chauvin Arnoux.
4. Velómetro marca Alnor.

Como resultado de las mediciones practicadas y del análisis e interpretación

conjunto de la información proporcionada por la empresa para el período en estudio, se presentan los perfiles del consumo de energía, así como siete proyectos de ahorro energético.

En el presente estudio se han identificado siete proyectos de ahorro energético que significan un ahorro anual de \$ 26,705.20 en la factura eléctrica y un ahorro anual de \$ 859,295 en la factura de combustóleos.

El ahorro total anual térmico esperado es de \$ 859,295 y representa un 62.13% del costo anual de combustóleos en la empresa.

La inversión requerida para ejecutar los siete proyectos es \$ 162,000 y un período simple de recuperación de la inversión promedio de 2.20 meses.

Palabras clave: Horno fundición, aluminio, ahorro energía, optimización, gases combustión.

ABSTRACT

The research corresponds to the optimization of the foundry area in an aluminum products factory.

To identify energy saving projects in the company's smelting area, it was necessary to establish where and how the energy is used, using the fuel oil bill during a year of operation and taking measurements with the following equipment:

1. Chauvin Arnoux brand electric energy analyzer.
2. Bacharach brand flue gas meter.
3. Chauvin Arnoux infrared temperature meter.
4. Alnor brand speedometer.

As a result of the measurements taken and of the analysis and joint interpretation of the information provided by the company for the period under study, the profiles of energy consumption are presented, as well as seven energy saving projects.

In the present study, seven energy saving projects have been identified, which mean an annual saving of \$ 26,705.20 in the electricity bill and an annual saving of \$ 859,295 in the fuel oil bill.

¹ PhD en Eficiencia Energética, MEng. En Energía Renovable y Eficiencia Energética, Código 472 del Registro Nacional de Investigadores, email: proenergia.com@gmail.com

OPTIMIZACIÓN EN HORNOS DE FUNDICIÓN EN INDUSTRIA DE ALUMINIO

Fecha enviada: 7 enero 2023

Fecha corregida: 27 marzo 2023

The expected total annual thermal savings is \$ 859,295 and represents 62.13% of the annual cost of fuel oil in the company.

The investment required to execute the seven projects is \$ 162,000 and a simple

period of average investment recovery of 2.20 months.

Keywords: Smelting furnace, aluminum, energy saving, optimization, combustion gases.

INTRODUCCIÓN

Debido al aumento del coste de los combustibles derivados del petróleo y de la energía eléctrica y a las dificultades del suministro, las empresas industriales han adoptado métodos de conservación de energía para reforzar su posición en los mercados. Es obvio que un ahorro en el consumo de los energéticos proporciona equipos más eficientes, contribuye a mantener en flujo de caja favorable y aumentar el capital disponible para otras actividades de la empresa.

La empresa a la cual se realizó el estudio térmico consume anualmente en energía \$ 2, 726,430, de este valor corresponde a combustóleo un 50.72% y a energía eléctrica 49.28%.

En la investigación se han identificado siete proyectos de ahorro energético que significan un ahorro anual de \$ 26,705.20 en la factura eléctrica y un ahorro anual de \$ 859,295 en la factura de combustóleos.

El ahorro total anual térmico esperado es de \$ 859,295 y representa un 62.13% del costo anual de combustóleos en la empresa.

Este ahorro servirá para aumentar el margen de rentabilidad respecto a los costos relacionados con la energía y podrían realizarse de tal forma que el o los proyectos de ahorro energético, con el ahorro obtenido, subsidien los siguientes.

La inversión requerida para ejecutar los siete proyectos es \$ 162,000 y un período simple de recuperación de la inversión promedio de 2.20 meses.

Se identificaron siete proyectos de ahorro energético que muestran un período simple de recuperación global de 2.2 meses.

El consumo de combustóleos se podrá reducir en un 62.13% que corresponde a 1, 645,911 litros de bunker y 80,638 litros de gas licuado de petróleo, equivalentes a un ahorro de \$ 859,296 anual.

En el Cuadro 1 se presenta en forma resumida los ahorros energético-económicos que pueden lograrse mediante la realización de los proyectos, los costos de ejecución y los períodos de recuperación.

En este caso **se presenta solo el proyecto 1 por el monto del ahorro que significa el 46.87% del total**

Cuadro 1.

Perfil de proyectos de ahorro energético identificados²

Descripción de la oportunidad de conservación de energía	Costo de ejecución (\$)	Ahorro anual (\$)	% Ahorro energía térmica	Período de recuperación (meses)
1. Mejorar la eficiencia térmica en el horno de fusión, reduciendo el flujo de aire de baja presión.	65,000	647,800	46.87	14.45

² De mediciones y metodología utilizada en (Santizo, 2008)

OPTIMIZACIÓN EN HORNOS DE FUNDICIÓN EN INDUSTRIA DE ALUMINIO

Fecha enviada: 7 enero 2023

Fecha corregida: 27 marzo 2023

2. Mejorar la eficiencia térmica en el horno de espera o retención, reduciendo el flujo de aire de baja presión.	45,000	125,477	9.07	4.41
3. Precalentamiento del aire de baja presión en horno de fusión.	35,000	49,669	3.59	8.46
4. Precalentamiento del aire de combustión en hornos de recocido BZA y BZB.	6,000	15,206	1.10	4.73
5. Calentamiento bunker utilizando los gases de escape del horno de fusión	1,000	18,196		0.66
6. Mejoramiento de la eficiencia de combustión de los hornos de recocido B2B y B2B	4,000	21,143	1.53	2.27
7. Precalentamiento del aire de calentamiento en hornos de recocido B7A y B7B	6,000	8,510		8.43
TOTAL	162,000	886,001	62.13%³	2.20 Meses

$$PRI = \left(\frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorro anual}} \right) \left(\frac{12 \text{ meses}}{\text{año}} \right) = \left(\frac{162,000}{886,001} \right) \left(\frac{12 \text{ mes}}{\text{año}} \right) = 2.20 \text{ meses}$$

CONSUMO DE ENERGIA

Perfil de consumo eléctrico:

De acuerdo con mediciones tomadas en planta, se establece el siguiente perfil de consumo eléctrico.

Cuadro 2.

Perfil de consumo eléctrico⁴

Equipo	Consumo (Kwh/año)	Porcentaje (%)
Horno fundición y retención (A1 y A2)	231,700	2.41

³ Porcentaje respecto energía térmica, pues el estudio se realizó únicamente a la parte térmica. Los proyectos 5 y 7 sustituyeron el calentamiento eléctrico por calentamiento con aire caliente de chimeneas hornos, debido a lo cual permitieron el ahorro que se menciona, pero no involucra ahorro de combustible [únicamente ahorro eléctrico].

⁴ De mediciones realizadas

OPTIMIZACIÓN EN HORNOS DE FUNDICIÓN EN INDUSTRIA DE ALUMINIO

Fecha enviada: 7 enero 2023

Fecha corregida: 27 marzo 2023

Coladora (A3)	110,214	1.15
Laminadora pesada (B1)	2,434,400	25.36
Laminadora liviana (B5)	2,331,000	24.29
Horno recocido LPG (B2A)	151,962	1.58
Horno recocido LPG (B2B)	170,151	1.77
Horno recocido E.E. (B7A)	594,500	6.19
Horno recocido E.E. (B7B)	615,000	6.41
Horno recocido (C8)	137,730	1.43
Separadora papel (B6A)	83,376	0.87
Cortadora pesada papel (B6B)	28,815	0.30
Rectificadora (E1)	1,296	0.01
Aire acondicionado	199,680	2.08
Bombas agua potable y de trasiego	93,600	0.97
Bombas suministro planta y recirculación	499,200	5.20
Aire comprimido	530,400	5.52
Iluminación	485,579	5.06
Calentador bunker	158,880	1.65
Otros servicios	739,978	7.75
TOTAL	Kwh/año 9,597,461	100%

Tomando como referencia el perfil de consumo eléctrico, se expresa el consumo eléctrico en función de áreas de trabajo, quedando este perfil de consumo eléctrico en la siguiente forma:

Cuadro 3.

Perfil de consumo eléctrico⁵

Área	Consumo (Kwh/año)	Porcentaje (%)
Fundición y colado.	341,914	3.56
Calentamiento y búnker	158,880	1.65
Laminación	4,765,400	49.65
Recocido	1,669,343	17.38
Servicios (aire acondicionado, comprimido, bombeo)	1,322,880	13.77
Iluminación	485,579	5.06

⁵ De mediciones realizadas

OPTIMIZACIÓN EN HORNO DE FUNDICIÓN EN INDUSTRIA DE ALUMINIO

Fecha enviada: 7 enero 2023

Fecha corregida: 27 marzo 2023

Otros procesos y servicios	853,465	8.93
TOTAL	9,597,461	100%

Perfil de consumo combustóleos

Combustóleo bunker se consume en los hornos de fundición y retención y gas licuado de petróleo (LPG) en los hornos de recocido, central térmica, horno de aleación Madre y en el arranque de los hornos de fundición y espera.

Consumo de bunker⁶:

En horno de fusión: 1, 826,860 litros

En horno de retención: 288,660 litros

Total: 2, 115,520 litros

Durante el año considerado, se consumió 2, 096,968 litros de bunker, existiendo una diferencia en consumo de acuerdo con el balance térmico realizado de +18,552 litros de bunker, que equivale a un + 0.88%.

Esta diferencia se disminuirá del consumo anual de bunker proporcionalmente. 86.35% para el horno de fundición y 13.65% para el horno de espera o retención, obteniéndose la siguiente distribución en consumo:

En horno de fusión:

1, 826,860 litros – 18,552 litros (0.8635) = 1, 810,840 litros de bunker.

En horno de retención:

288,660 litros – 18,552 litros (0.1365) = 286,128 litros bunker

A continuación, se presenta el perfil de consumo de bunker.

Cuadro 4.

Perfil consumo búnker

Equipo	Consumo de bunker (litros)	%
Horno fusión	1,810,840	86.35

Horno retención	286,128	13.65
TOTAL	2,096,968 L	100.00

Consumo de gas licuado de petróleo (LPG)

Consumo de LPG en central térmica:

Datos:

Potencia instalada (placa): 230,000 Kcal/h

Poder calorífico LPG: 11,066.7 Kcal/kg

Densidad LPG: 0.8 Kg/L

Razón de encendido: 0.36 (de acuerdo con registrador de amperaje instalado en el motor del extractor de aire del quemador, durante 24 horas)

LPG consumido:

$$\frac{\left(230,000 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}\right)}{\left(11,066.7 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}}\right)(0.35 \text{ encendido})} = 7.482 \text{ Kg } \frac{\text{LPG}}{\text{h}}$$

$$\left(7.482 \text{ Kg } \frac{\text{LPG}}{\text{h}}\right) \left(6620 \frac{\text{h}}{\text{año}}\right) = 49,531 \text{ Kg LPG } \frac{\text{consumidores}}{\text{año}}$$

$$\frac{\left(49,531 \frac{\text{Kg}}{\text{año}}\right)}{\left(0.8 \frac{\text{Kg}}{\text{L}}\right)} = 61,914 \text{ litros LPG } \frac{\text{consumidos}}{\text{año}}$$

Consumo de LPG en hornos de recocido:

Para calcular el consumo de LPG en los hornos de recocido, se debe conocer el contenido de calor en la chimenea de combustión, contenido de calor en la chimenea de aire dilución, calor absorbido por el aluminio y pérdidas por radiación-convección a través de las paredes del horno, es decir realizar un balance de materia y energía completo.

⁶ De proyectos de ahorro 1 y 2

OPTIMIZACIÓN EN HORNOS DE FUNDICIÓN EN INDUSTRIA DE ALUMINIO

Fecha enviada: 7 enero 2023

Fecha corregida: 27 marzo 2023

Contenido calorífico en chimenea de combustión:

Datos:

Diámetro: 0.5588m

Velocidad promedio: 16 m/s

Temperatura promedio: 100 °C

Operación: 3,745 h/año.

Cálculo:

$$\text{Area} = (3.1416)(0.2794\text{m})^2 = 0.2452\text{m}^2$$

Flujo volumétrico :

$$\left(16 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)(0.2452 \text{ m}^2) = 3.9232 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Flujo masico :

$$\left(3.9232 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)\left(3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}\right)\left(3745 \frac{\text{h}}{\text{año}}\right) \\ = 52892582 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$\left(52892582 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}\right)\left(0.914 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) = 48343820 \frac{\text{Kg}}{\text{año}}$$

Contenido calorífico:

$$\left(48343820 \frac{\text{Kg}}{\text{año}}\right)\left(0.242 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}\right)(110^\circ\text{C} - 32^\circ\text{C}) \\ = 912.54 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{año}} - \text{horno}$$

Contenido calorífico en chimenea de dilución:

$$(\text{de proyecto 4.}) = 59.23 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{año}}$$

Calor absorbido por el aluminio:

Aluminio recocido/horno:

$$\left(8347329 \frac{\text{Kg}}{\text{año}}\right)(0.9) + (0.25)\left(8347329 \frac{\text{Kg}}{\text{año}}\right)\left(\frac{0.9}{2}\right) \\ = 4,695,372 \text{ Kg recocido / horno LPG}$$

Calor absorbido por el aluminio:

$$(4,695,372\text{Kg})\left(0.25 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}\right)(350^\circ\text{C} - 32^\circ\text{C}) \\ = 373.28 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{año}}$$

Pérdidas por radiación-convección a través de las paredes del horno:

Datos:

Área horno: 1,591.69 pie²

Temperatura superficial promedio: 167 °F

Temperatura ambiente: 90 °F

Emisividad: 0.8

Operación: 3,745 h/año

Calor cedido a los alrededores:

$$(0.174)(0.8)\left(\frac{167 + 460}{100}\right)^4 - \left(\frac{90 + 460}{100}\right)^4 \\ + 0.286(167 - 90)^{1.25} \\ = 194.89 \frac{\text{Btu}}{\text{pie}^{2\text{h}}} \\ \left(194.89 \frac{\text{Btu}}{\text{pie}^{2\text{h}}}\right)(1591.69\text{pie}^2)\left(3745 \frac{\text{h}}{\text{año}}\right)\left(0.252 \frac{\text{Kcal}}{\text{Btu}}\right) \\ = 292.75 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{año}}$$

Resultados:

Cuadro 5.

Perfil consumo LPG horno recocido⁷

Parámetro	Calor requerido 10 ⁶ Kcal/año	Combustible equivalente (litros LPG) ⁸	%
Contenido calorífico en chimenea	912.54	103,069	55.71

⁷ De mediciones realizadas según metodología de (Santizo, 2008)

⁸ 8,853.66 Kcal/L de LPG

OPTIMIZACIÓN EN HORNOS DE FUNDICIÓN EN INDUSTRIA DE ALUMINIO

Fecha enviada: 7 enero 2023

Fecha corregida: 27 marzo 2023

de combustión			
Contenido calorífico en chimenea de dilución	59.23	6,690	3.62
Calor absorbido por el aluminio	373.28	42,161	22.79
Pérdidas por radiación-convección en las paredes del horno	292.75	33,065	17.88
		184,985 L LPG	100%

(184,985 lt LPG)(2)

= 369,970 litros anuales LPG

Cuadro correspondiente al perfil de consumo de LPG:

Cuadro 6.

Perfil consumo LPG

Equipo	Consumo LPG (litros)	%
Central térmica	69,914	10.66
Hornos de recocido	369,970	56.44
Horno fusión, retención y aleación. (por diferencia)	215,625	32.90
TOTAL	655,509 L	100.00

Los dos hornos de recocido consumen:

Proyectos de Ahorro Energético

PROYECTO 1.

Mejorar la eficiencia del horno de fusión reduciendo el flujo de aire de baja presión

Recomendación

Reducir el nivel de flujo de aire de baja presión instalando un dämpers antes del extractor de baja presión y en la parte de arriba de la chimenea de gases de combustión, reducir la capacidad de la boquilla de atomización y cambiar de combustóleo.

Justificación

Del estudio efectuado en la planta, se obtuvieron los parámetros necesarios para realizar un balance integral de masa y energía,

obteniéndose a partir de éste, una eficiencia de combustión de 16.42% y una eficiencia térmica del 12.64%⁹.

Una eficiencia térmica del 12.64% significa que cada 100 litros de bunker, únicamente 12.64 litros son aprovechados por el aluminio; 3.78 litros se pierden por la transferencia de calor hacia los alrededores y compuertas [pérdidas por radiación y convección] y 83.58 litros de bunker se pierden a través de los gases de combustión.

De acuerdo con otros hornos de fundición de aluminio similares, la eficiencia de combustión

⁹ La eficiencia de combustión se mide de acuerdo con la pérdida en los gases de escape en los hornos y la eficiencia

térmica toma en cuenta también la pérdida de energía por radiación y convección a través de las paredes del horno.

OPTIMIZACIÓN EN HORNOS DE FUNDICIÓN EN INDUSTRIA DE ALUMINIO

Fecha enviada: 7 enero 2023

Fecha corregida: 27 marzo 2023

oscila entre el 40% a 60%¹⁰ (en nuestro caso del 12.64%)

La misma eficiencia térmica del 12.64% se debe a:

1. Flujo elevado del aire de baja presión
2. Mínimo período de residencia del aire de baja presión
3. Atomización sobredimensionada.
4. Combustóleo inadecuado.

Cálculo de la eficiencia de combustión y eficiencia térmica.

El horno de reverbero para fusión de aluminio utiliza combustóleo No. 3 que equivale al Diesel marino y corresponde al diseño de los quemadores; en la empresa lo utilizan con combustóleo No. 6, que equivale al búnker pesado.

Para determinar la eficiencia del horno de reverbero para fusión de aluminio, debe

Calentamiento del aluminio de la temperatura de entrada al horno hasta la temperatura de fusión:

Calor específico (C_p): $0.24 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$ (Handbook of Chemical Engineers, John H. Perry.

Temp. fusion (T_f): 660°C (Handbook of Chemical Engineers, John H. Perry.

Temp. ambiente (T_a): 32°C .

Producción anual: 8,347, 329 Kg. de aluminio fundido.

Operación: 6,264 h/año.

Siendo: $Q = m C_p (T_c - T_a)$

Donde: Q = calor absorbido por el aluminio, Kcal/año

m = producción de aluminio, Kg/año.

realizarse un balance de materia y energía en el horno.

El balance de materia y energía involucra los siguientes cálculos:

1. Calentamiento del aluminio de la temperatura de entrada al horno hasta la temperatura de fusión.
2. Transformación del aluminio sólido a su fase líquida.
3. Sobrecalentamiento del aluminio
4. Pérdida de calor a través de la puerta principal de carga.
5. Pérdida de calor a través de la fosa de escoriado.
6. Pérdida de calor a través de las paredes del horno (pérdidas por radiación y convección).
7. Pérdida de calor en los gases de chimenea.

C_p = capacidad calorífica promedio del aluminio, Kcal/Kg $^\circ\text{C}$

T_f = temperatura de fusión, $^\circ\text{C}$

T_a = temperatura ambiente, $^\circ\text{C}$,

Aplicando:

$$\left(8,347,329 \frac{\text{Kg}}{\text{año}}\right) \left(0.25 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}\right) (660^\circ\text{C} - 32^\circ\text{C})$$
$$= 1,310.53 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{año}}$$

Transformación del aluminio sólido a su fase líquida:

Calor de fusion (C_f):

94.51 Kcal/kg, (handbook of chemical Engineers, John H. Perry

Siendo:

¹⁰ Handbook of Aluminium, volumen 1 - Physical Metallurgy and Process -, George E. Totten and D. Scott MacKenzi pág. 881

OPTIMIZACIÓN EN HORNO DE FUNDICIÓN EN INDUSTRIA DE ALUMINIO

Fecha enviada: 7 enero 2023

Fecha corregida: 27 marzo 2023

$$Q = mC_f$$

Donde:

Q = calor absorbido debido al cambio de fase, Kcal/año

m = producción aluminio, Kg/año

C_f = calor de fusión. Kcal/Kg

Aplicando:

$$\left(83,347,329 \frac{\text{Kg}}{\text{año}}\right) \left(94.51 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}\right) = 788.91 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{año}}$$

Sobrecalentamiento del aluminio

Calor específico (CP): $0.25 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$

Temperatura máxima (T_m): 760°C

Temperatura fusión (T_f): 660°C

Producción anual: 8, 347,329 Kg/año

Siendo:

$$Q = (\text{Producción anual}) (C_p) (T_m - T_f)$$

Donde:

Q = calor de sobrecalentamiento, Kcal/año

T_m = temperatura máxima que alcanza el baño de aluminio, $^\circ\text{C}$.

T_f = temperatura de fusión, $^\circ\text{C}$.

Aplicando:

$$\left(8,347,329 \frac{\text{Kg}}{\text{año}}\right) \left(0.25 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}\right) (760^\circ\text{C} - 660^\circ\text{C})$$
$$= 208.69 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{año}}$$

Pérdida de calor a través de la puerta principal de carga.

Temperatura superficial (T_s): 730°C (1346°F),

tomado con pirómetro de radiación.

Temperatura ambiente (T_a): 32°C (90°F)

Emisividad aire (e): 0.06

Área exterior compuerta: 47.25 pie^2

La puerta principal de carga se abre durante 20 a 25 minutos, cuatro veces por turno, que equivale a 1,170 horas anuales.

Siendo:

$$Q = 0.174 \epsilon \left[\left(\frac{T_s + 460}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 460}{100} \right)^4 \right] + 0.296 (T_s - T_a)^{1.25}$$

$$Q \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{año}} \right]$$

$$= Q \left[\frac{\text{Btu}}{\text{h.pie}^2} \right] (\text{horas compuerta abierta}) \left(\frac{0.252 \text{ Kcal}}{\text{Btu}} \right)$$

Donde:

Q = pérdida de calor, Btu/hpie²

T_s = temperatura superficial, $^\circ\text{F}$

T_a = temperatura ambiente, $^\circ\text{F}$

Aplicando:

$$(0.174) (0.06) \left[\left(\frac{1346 + 460}{100} \right)^4 - \left(\frac{90 + 460}{100} \right)^4 \right]$$

$$+ 0.296 (1346 - 90)^{1.25} = 3314 \frac{\text{Btu}}{\text{pie}^2\text{h}}$$

$$\left(3314 \frac{\text{Btu}}{\text{pie}^2\text{h}} \right) (47.25 \text{ pie}^2) \left(1170 \frac{\text{h}}{\text{año}} \right) \left(0.252 \frac{\text{Kcal}}{\text{Btu}} \right)$$

$$= 46.17 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{año}}$$

Pérdida de calor a través de la fosa de escoriado.

La fosa de escoriado se abre durante 20 a 25 minutos, una vez por turno, que equivale a 292.5 horas anuales.

Área exterior de la compuerta: 28.06 pie^2

Aplicando:

$$\left(3314 \frac{\text{Btu}}{\text{pie}^2\text{h}} \right) (28.06 \text{ pie}^2) \left(292.5 \frac{\text{h}}{\text{año}} \right)$$

$$\left(0.252 \frac{\text{Kcal}}{\text{Btu}} \right) = 6.85 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{año}}$$

Pérdida de calor a través de las paredes del horno (por radiación y convección)

OPTIMIZACIÓN EN HORNOS DE FUNDICIÓN EN INDUSTRIA DE ALUMINIO

Fecha enviada: 7 enero 2023

Fecha corregida: 27 marzo 2023

Temperatura promedio superficial =
85°C (185°F), tomando con pirómetro de
radiación.

Temperatura ambiente = 32°C (90°F)

Área exterior del horno = 2001.36 pie²

Operación del horno = 6264 h/año

Emisividad paredes horno 0.8

Aplicando:

$$(0.174)(0.8) \left[\left(\frac{185+460}{100} \right)^4 - \left(\frac{90+460}{100} \right)^4 \right] \\ + 0.296 (185-90)^{1.25} = 201.34 \frac{\text{Btu}}{\text{pie}^2\text{h}} \\ \left(201.34 \frac{\text{Btu}}{\text{pie}^2\text{h}} \right) (2001.36 \text{pie}^2) \left(6264 \frac{\text{h}}{\text{año}} \right) \left(0.252 \frac{\text{Kcal}}{\text{Btu}} \right) \\ = 636.07 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{año}}$$

Pérdida de calor en los gases de chimenea:

Velocidad promedio: 7.5 m/s

Temperatura promedio: 824°C

Temperatura ambiente: 32°C

Diámetro chimenea: 49.5 pulgadas
(1.2573 m)

Densidad¹¹ a 824 °C = 0.3206 $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

Calor específico: 0.286 Kcal/Kg°C.

Aplicando:

Área seccional chimenea

$$(3.1416)(0.62865 \text{m}^2) = 1.24156 \text{m}^2$$

Flujo volumétrico

$$\left(7.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) (1.24156 \text{m}^2) = 9.3117 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Flujo másico

$$\left(9.3117 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \left(0.3206 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = 2.985 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$\left(2.985 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right) \left(3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \right) \left(6264 \frac{\text{h}}{\text{año}} \right)$$

$$= 67,312,944 \frac{\text{Kg}}{\text{año}}$$

Pérdida de calor en los gases de chimenea:

$$\left(67,312,944 \frac{\text{Kg}}{\text{año}} \right) \left(0.286 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \right) (824^\circ\text{C} - 32^\circ\text{C})$$

$$= 15,247.19 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{año}}$$

Cuadro 7.

Perfil consumo búnker horno fusión¹²

Parámetro	Calor utilizado (10 ⁶ Kcal/año)	Combustible equivalente (litros Bunker) ¹³	%
Calentamiento del aluminio de la temperatura de entrada al horno hasta la temperatura de fusión.	1,310.53	131,227	7.18
Transformación del aluminio sólido a su fase líquida.			

¹¹ Administración y utilización de la Energía en su Industria, Mario Santizo, ICAITI

¹² De mediciones realizadas según (Thuman & Dunning, 2008)

¹³ 9,986.76 Kcal/litro

OPTIMIZACIÓN EN HORNOS DE FUNDICIÓN EN INDUSTRIA DE ALUMINIO

Fecha enviada: 7 enero 2023

Fecha corregida: 27 marzo 2023

	788.91	78,996	4.32
Sobrecalentamiento del aluminio	208.69	20,897	1.14
Pérdida de calor a través de la puerta principal de carga.	46.17	4,623	0.25
Pérdida de calor a través de la fosa de escoriado.	6.85	686	0.04
Pérdida de calor a través de las paredes del horno.	636.07	63,691	3.49
Pérdida de calor en los gases de escape.	15,247.19	1,526,740	83.58
	18,035.72	1,826,860	100.00

Del cuadro 7 [cuadro anterior] se observa que únicamente se aprovecha por el aluminio el 12.64%:

$$7.18\% + 1.14\% = 12.64\%$$

La mayor pérdida de calor corresponde a los gases de escape, siendo esta pérdida del 83.58%.

Ahorro energético y monetario:

De acuerdo con otros hornos de fundición de minerales metálicos y procesos pirometalúrgicos, la eficiencia de combustión oscila entre el 40% a 60%¹⁴.

Tomando como referencia el promedio, es decir, una eficiencia de combustión del 50%, el ahorro estimado sería: combustible no utilizado por el aluminio operando a una eficiencia de combustión del 50%:

300,120 litros de combustible no utilizados por el aluminio con una eficiencia de combustión del 50%.

Ahorro en combustible:

Pérdida actual en combustible:

1, 595,740 litros – 300,120 litros = 1, 295,620 litros de combustible desperdiciados

actualmente incrementando la eficiencia del horno del 12.64% al 50%.

$$\begin{aligned} & (1,295,620 \text{ L}) \left(0.50 \frac{\$}{\text{L}} \right) \\ & = 647,800 \frac{\$}{\text{ahorrados año}} \end{aligned}$$

Es decir, al aprovechar los gases de combustión del horno de fusión, se obtiene un ahorro equivalente a \$ 647,800 anuales.

Inversión:

Sistema de atomización adecuados:

$$(\$ 20,000) (3) = \$ 60,000$$

Dampers a la entrada del aire de baja presión y chimenea de gases escape:

$$\$ 5,000$$

Inversión total: \$ 65.000

Período simple de recuperación:

$$\begin{aligned} \text{PSR} &= \left(\frac{\text{Inversion}}{\text{Ahorro}} \right) \left(12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} \right) \\ &= \left(\frac{\$65,000}{\$647,810} \right) \left(12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} \right) = 14.45 \text{ meses} \end{aligned}$$

¹⁴ Handbook of Aluminium, volumen 1 - Physical Metallurgy and Process -, George E. Totten and D. Scott MacKenzi pág. 881

¹⁵ Precio correspondiente a mayo 2011

OPTIMIZACIÓN EN HORNOS DE FUNDICIÓN EN INDUSTRIA DE ALUMINIO

Fecha enviada: 7 enero 2023

Fecha corregida: 27 marzo 2023

Es decir, la inversión directa se recupera en 15 meses.

CONCLUSIONES

1. La empresa a la cual se realizó el estudio térmico consume anualmente en energía \$ 2, 726,430, de este valor corresponde a combustóleo un 50.72% y a energía eléctrica 49.28%.
2. En la investigación se han identificado siete proyectos de ahorro energético que significan un ahorro anual de \$ 26,705.20 en la factura eléctrica y un ahorro anual de \$ 859,295 en la factura de combustóleos.
3. El ahorro total anual térmico esperado es de \$ 859,295 y representa un 62.13% del costo anual de combustóleos en la empresa.
4. Este ahorro servirá para aumentar el margen de rentabilidad respecto a los
5. costos relacionados con la energía y podrían realizarse de tal forma que el o los proyectos de ahorro energético, con el ahorro obtenido, subsidien los siguientes.
6. La inversión requerida para ejecutar los siete proyectos es \$ 162,000 y un período simple de recuperación de la inversión promedio de 2.20 meses.
7. Se identificaron siete proyectos de ahorro energético que muestran un período simple de recuperación global de 2.2 meses.
8. El consumo de combustóleos se podrá reducir en un 62.13% que corresponde a 1, 645,911 litros de bunker y 80,638 litros de gas licuado de petróleo, equivalentes a un ahorro de \$ 859,296 anual.

Bibliografía

- Capehart, B., Turner, W., & Kennedy, W. (2008). *Guide to Energy Management* (Fifth edition ed.). United States of America: Fairmont Press, Inc.
- Farret, F., & Simoes, G. (2006). *Integration of Alternative Sources of Energy*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Goswami, Y., & Kreith, F. (2008). *Energy Conservation*. United States of America: CRC Press.
- Horlock, J. (2002). *Combined Power Plants*. Florida: John Wiley & Sons, Inc.
- Krarti, M. (2008). *Energy Audits of Building Systems*. United States of America: CRC Press.
- Raja, A., Srivastava, R., & Dwivedi, M. (2006). *Power Plant Engineering*. New Dehli: New Age International.
- Raju, N. (2007). *Industrial Energy Conservation Techniques*. India: Atlantic.
- Rayaprolu, K. (2009). *Boilers Power and Process*. United States of America: CRC Press.
- Santizo, M. (2008). *Balance de Materia y Energía*. Guatemala: Centroamericana.
- Thuman, A., & Dunning, S. (2008). *Guide to Energy Conservation* (Ninth Edition ed.). New York: Fairmont Press, Inc.
- Totten, G., & Mackenzi, S. (2000). *Handbook of Aluminium: Physical Metallurgy and Process* (Vol. volumen 1). New Dehli: Atlantic.