

Reconstrucción y funcionamiento de horno crisol para fundición de chatarra de aluminio en Ayacucho

Reconstruction and operation of crisol furnace for casting aluminum Scrap in Ayacucho

Luis Alberto Cossio Herrera^{1,a}, Abrahán Fernando Trejo Espinoza^{1,b}, Angel Gustavo Davalos Calderon^{2,c}, Jorge Alberto Ortiz Barreto^{3,d}

Recibido: 27/02//2024 - Aprobado: 05/04/2024 – Publicado: 12/06/2024

RESUMEN

El objetivo general fue reconstruir y poner en funcionamiento el horno crisol para la fundición de chatarra de aluminio en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga – Ayacucho. Los objetivos específicos fueron evaluar las etapas de la reconstrucción, incluyendo la modificación del diseño y funcionamiento del horno crisol para la fundición de chatarra de aluminio; obtener objetos (productos terminados) mediante diferentes técnicas de moldeo; y realizar los balances de materia y energía usando como combustible petróleo y gas. El nivel de investigación fue experimental tecnológico y el método analítico comparativo. El diseño fue explicativo experimental. Se realizaron cuatro pruebas, utilizando inicialmente petróleo como combustible líquido y luego gas, mejorando así el proceso de fundición de aluminio con un alto porcentaje de recuperación. Se implementó un tablero de control automatizado para el uso de gas como combustible. Además, se experimentaron diferentes técnicas de moldeo. Se realizó el balance de materia, incluyendo cálculos de la carga y productos del horno, y el cálculo del aire alimentado y los gases emitidos por el horno. Se recomienda continuar con otras investigaciones en el ámbito de la metalurgia transformativa, ya que una forma de reducir la contaminación por aluminio es reciclarlo, lo que lo convierte en un metal sostenible.

Palabras claves: Aluminio, chatarra, fundición, horno crisol, reciclar.

ABSTRACT

The general objective was to rebuild and put into operation the crucible furnace for smelting aluminum scrap at the National University of San Cristóbal de Huamanga – Ayacucho. The specific objectives were to evaluate the stages of the reconstruction regarding the modification of the design and operation of the crucible furnace for the smelting of aluminum scrap. Obtaining objects (finished products) through different molding techniques. Carry out material and energy balances using oil and gas as fuel. The level of research was technological experimental, and the analytical method was comparative. The design was explanatory experimental. 4 tests were carried out using oil as liquid fuel, then gas, thereby improving the aluminum smelting process, with a high recovery percentage. It was implemented with an automated control panel for the use of gas as fuel. Different molding techniques were also experimented with. The material balance, calculations of the kiln load and products, calculation of the fed air and gases leaving the kiln were carried out. It is recommended to continue with other research in the field of transformative metallurgy since one way to reduce aluminum pollution is by recycling it, which is why it is considered a sustainable metal.

Keywords: Aluminum, scrap, foundry, crucible furnace.

1 Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia. Ayacucho, Perú.

2 Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia, Nasca, Perú.

3 Autor independiente.

a Autor para correspondencia: luis.cossio@unsch.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4778-9382>

b E-mail: abraham.trejo@unsch.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2314-7350>

c E-mail: angel.davalos@unica.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8258-2854>

d E-mail: j.ortiz.b30@gmail.com - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5217-4510>

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación por aluminio es preocupante debido a que la industria del aluminio emite millones de toneladas de gases de efecto invernadero, como el CO₂ cada año, lo que contribuye al calentamiento global (Zuñiga, 2023). También produce óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno, gases altamente tóxicos que provocan la lluvia ácida. La contaminación por aluminio comienza con la extracción de bauxita del suelo y tiene graves impactos ambientales. La minería de bauxita destruye toda la vegetación de la zona, lo que ocasiona la pérdida de hábitat y alimento para los animales locales, y también tiene un impacto significativo en la erosión del suelo (Del Valle, 2021). Además, el proceso de conversión de bauxita en aluminio requiere grandes cantidades de energía y agua, pero una vez que se obtiene aluminio puro, este es extremadamente estable (Gabriel, 2023). Durante la fundición y procesamiento del aluminio, se liberan diversos gases como CO₂, perfluorocarbonos, SO₂ y NaF, todos ellos gases de efecto invernadero altamente nocivos (Basilio & Basilio, 2022).

1.1 Antecedentes

Dionicio et al. (2004): Experimentó con diferentes mezclas de arena de fundición para lograr las mejores propiedades de permeabilidad y resistencia a la compresión. Se logró una permeabilidad de 235 con 7% de bentonita de sodio y 4% de humedad.

- Alvayero & Huezo (2009): Presentó el diseño de un horno para fundición de aluminio de 136 kg de capacidad, la estructura de soporte del horno, así como el sistema de giro por medio de un sistema hidráulico. Tomó como referencia el diseño del vertedero de aluminio líquido para los moldes, así como los accesorios que dispondrá el horno.
- Perez & Soto (2009): Refiere que las piezas fundidas producidas en este horno tienen la misma calidad que las de los hornos comerciales, ya que el ambiente en la cámara de combustión está diseñado para soportar temperaturas inferiores a 1750 °C. Parámetros de diseño recomendados, todos los cuales están diseñados para lograr una combustión óptima y proporcionar turbulencia, promoviendo así una temperatura uniforme en el horno. El combustible y el aire deben mezclarse en las proporciones correctas, 3/4" del flujo total del aire y 1/4" del flujo de combustible durante el encendido, con la combustión máxima activada.
- Kida et al. (2010): Concluye que la pared del horno consta de tres partes: ladrillos refractarios, aislante y una carcasa de acero de 1/16 pulgadas como estructura de soporte. Usa gas doméstico o GLP. El aire se sopla a través de una turbina eléctrica para la combustión. Como tanque de fusión se utiliza un crisol de grafito con una capacidad de 8 kg. La innovación es que el flujo de calor se conduce a través de espirales colocadas en la pared interna del material refractario y, para evitar la pérdida de calor, se utilizan como aislantes térmicos aglomerados a base de CaSO₄ y dióxido de silicio, que tienen baja conductividad

térmica. Para 1 kg de aluminio demora 10 minutos y 400 g de GLP. Realizar balance de materia y energía para alcanzar el 72% de eficiencia.

- Villacorta et al. (2011): Las piezas fundidas de hierro gris laminar y las de hierro nodular, las cuales contienen no más del 4% de cobre y se enfrían en un molde de arena con una solubilidad aparente limitada de cobre, producen piezas fundidas resistentes al calor y al desgaste. Como resultado, se mejora la templabilidad del hierro gris y del hierro nodular.
- Niño (2012): Afirma que un horno de crisol inclinado es una opción muy práctica. Se trata de hornos móviles montados sobre un sistema de soporte que puede inclinarse alrededor de un eje horizontal para realizar la fundición sin necesidad de retirar el crisol de la carcasa metálica. Esto simplifica el proceso de verter metal en el molde utilizando un cucharón. Se utiliza cuando el volumen de producción supera los 100 kg.
- Mestanza & Lara (2012): Indica que su objetivo era diseñar y construir un horno industrial para fundir aluminio reciclado y utilizarlo como dispositivo de enseñanza en un laboratorio de la Facultad de Ciencias. Para la construcción se utilizaron los siguientes materiales: crisoles de grafito, ladrillos refractarios, cemento refractario, hormigón refractario, techos cerámicos, acero inoxidable pulido, accesorios como llaves, quemadores de alta presión, dispositivos de control de gases, termopares y termómetros. A partir de los cálculos de tamaño se construyó un dispositivo con un diámetro de 65.7 cm y una altura de 62 cm. Su pérdida de calor es de 2,195.8 kcal/h, lo que corresponde a una eficiencia del 79%.
- Flores & Orellana (2014): Refiere que, en el horno de crisol, el metal a fundir se coloca en un crisol de grafito, que se coloca en una cámara de combustión cilíndrica, estando el exterior formado por una camisa de chapa de acero y el interior revestido con material refractario. El diseño del horno tiene aproximadamente 50 cm de alto y 50 cm de diámetro. La potencia mínima necesaria para fundir un lote de aleación de aluminio se determina mediante análisis termodinámico y arroja un valor de 12.50 kW (42,550 BTU/h).
- Fernández (2019): Ha desarrollado un plan de negocios óptimo para establecer una nueva microempresa en la ciudad de Puno especializada en la producción de perfiles de aluminio utilizando aluminio reciclado como materia prima.
- Quispe (2020): Menciona el diseño y construcción de moldes permanentes de bronce para la fabricación de piezas de moldura de aluminio. Fabrimetx fabrica adornos mediante fundición en arena verde. El objetivo de esta investigación es crear moldes duraderos a partir de materiales reciclados para la elaboración de moldes de bronce, y el aluminio reciclado se utilizará como materia prima para la producción de adornos.

- Antay & Pfuero (2022): Diseñó y construyó un horno de crisol inclinado para fundición de aluminio con el fin de establecer un laboratorio en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica. La composición interna del horno de crisol basculante es 60% de ladrillo refractario con alto contenido de alúmina. El aislamiento es de fibra cerámica y la parte exterior es de carcasa de acero ASTM A 36. El tamaño de la cámara de combustión del horno de crisol se determinó considerando las dimensiones de un crisol de carburo de silicio de 50 kg. Finalmente, se realizaron pruebas de puesta en marcha y soldadura en el taller de fundición y moldes. En la primera prueba de fusión se cargaron 5 kg de aluminio reciclado y se logró la fusión después de 35 minutos. En la segunda prueba de fusión se cargaron 10 kg de aluminio reciclado y se logró la fusión al cabo de 65 minutos.
- Aquima & Carlos (2022): Menciona que se diseñó y construyó un horno de crisol inclinado para la fundición de chatarra de aluminio utilizando gas natural, con el propósito de establecer el Taller de Fundición Metalúrgica de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC). Las dimensiones del crisol se midieron con referencia a un diámetro interno de 32.7 cm, un diámetro de 68.9 cm y una altura de 67.5 cm.

II. MÉTODOS

2.1. Diseño de investigación

La investigación desarrollada representa un diseño experimental, ya que se aplicaron los resultados de la fundición y diferentes pruebas de moldeo, para luego realizar la fundición de chatarra de aluminio con petróleo y gas. En este proceso, se realizó el balance de materia y energía en Ayacucho, en un periodo de tiempo determinado.

La Figura 1 muestra el diagrama esquemático del diseño de la investigación.

2.2. Procedimiento metodológico de la investigación

Recopilación de información y reconocimiento de la problemática.

- Mejora del diseño en la descarga y del impulsor de calor.
- Alimentación de combustible líquido.
- Caracterización de la materia prima y el producto.
- Alimentación de combustible a gas y control automatizado.
- Mejora del diseño de prototipos.
- Fundición de chatarra con petróleo.
- Realización del balance de materia y energía con petróleo.
- Fundición de chatarra con gas.
- Realización del balance de materia y energía con gas.
- Discusión de las pruebas experimentales de la fundición.

III. RESULTADOS

3.1. Recolección de muestras

La recolección de materia prima: envases de cerveza en lata, gaseosa en lata, que son elaborados con aluminio; en la Figura 2, se presentan los registros de recolección de muestras para la materia prima.

3.2. Mejora del diseño impulsor de calor

Luego de evaluar el horno basculante y determinar que se encontraba en estado de abandono, obsoleto y con un diseño muy antiguo que resultaba en un consumo excesivo de combustible, se decidió realizar modificaciones. Este horno no se estaba utilizando con fines didácticos, para los cuales había sido adquirido originalmente. Con la ayuda del taller mecánico de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, se implementaron las adaptaciones propuestas en el diseño impulsor de calor. En la Figura 3 se muestran las mejoras realizadas al horno de fundición, las cuales se detallan en la Tabla 1.

3.3. Alimentación de combustible

De las evaluaciones realizadas se pudo observar que el problema de alimentación de combustible, en este caso, petróleo, no contaba con el impulso necesario para la ignición y formación de la llama óptima. Se ha adaptado una escalera metálica y plataforma, una válvula, y se ha mejorado el funcionamiento del ventilador que impulsa aire para mejorar la reacción de combustión del combustible, mediante la dosificación de combustible a través de una válvula de control. En la Figura 4 se muestra la plataforma donde está ubicado el combustible para alimentación por gravedad, mejorada para una mejor ignición, y en la Tabla 2 se describen los detalles.

3.4. Mejora del diseño en la descarga

El proceso de descarga en el horno basculante original presentaba problemas debido al tamaño y peso del crisol, la temperatura del material fundido, el traslado del material a los moldes y la adquisición de los elementos de protección personal según el protocolo. Por ello, se realizaron las modificaciones necesarias para superar estas deficiencias.

En la Figura 5 se muestra la colada con mayor rendimiento, y en la Tabla 3 se describen los procedimientos de mejora realizados.

3.5. Mejora del diseño de prototipos

Al inicio, se encontraron los moldes completamente deteriorados. Se realizó la adaptación de materiales para el uso de moldes prototipo y, luego de las pruebas realizadas, se comprobó su funcionalidad. En la Tabla 4 se establecen las cinco formulaciones, los porcentajes de constituyentes óptimos para cada pieza, el material del modelo y los detalles del molde.

En la Figura 6 la muestra de moldeo aplicando las diferentes técnicas para prototipos.

Figura 1

Diseño de la investigación experimental, transversal para la reconstrucción y funcionamiento de un horno de crisol para fundición de chatarra en Ayacucho



Nota: A) Horno de crisol al inicio (inoperativo) - B) Al final de la investigación (operativo).

Figura 2

Recolección de muestras de aluminio llevada a cabo por los estudiantes



Figura 3

Imágenes de la mejora del diseño impulsor de calor en periodos de tiempo



Tabla 1

Mejora del diseño impulsor de calor

Nº	Descripción
1	Impulsor de calor se realizó la mejora adecuada, ya no será basculante, porque en la descarga del material fundido hay problemas en la descarga.
2	La tapa del equipo de fundición es fija y solamente con el giro horizontal permitirá abrir el equipo de fundición. Altura 13 cm. Diámetro 57 cm
3	El horno de crisol ya no será basculante, ahora será fijo. Altura 47 cm. Diámetro 55 cm. Espesor de los ladrillos refractarios 12 cm.

Tabla 2
Alimentación de combustible

N°	Descripción
1	Mejora de alimentador de combustible, al colocar en una plataforma en parte superior de la escalera metálica para que exista el flujo necesario del combustible al quemador.
2	Control de flujo de combustible por medio de una válvula cercana al ventilador.
3	El quemador tiene una longitud de 156 cm y un diámetro de 7,5 cm

Figura 4
Presentación de la plataforma de la alimentación de combustible



Figura 5
Mejora del diseño en la descarga de la colada en el laboratorio



Tabla 3
Mejora del diseño en la descarga

N.º	Descripción
1	Mejora de la extracción del crisol y descarga con nuevo diseño. El crisol tiene una altura de 35 cm, en la parte inferior el diámetro exterior mide 18 cm. El diámetro exterior en la parte superior mide 25 cm. El espesor del crisol es de 2,5 cm. Implementación de tenazas metálicas de descarga con 2 brazos. El brazo recto 60 cm.
2	El brazo inclinado mide 30 cm, las zonas donde se encuentran las 2 agarraderas para el crisol mide 26 cm.
3	La pinza bascular de crisol mide 197 cm de largo y la zona para que agarre un operador mide 50 cm de ancho y 20 cm de largo. En la zona central se encuentra el aro de 24 cm de diámetro para que ingrese el crisol.
4	Uso adecuado de equipos de protección personal (EPP).

Tabla 4

Formulaciones para los moldes y efecto en su resultado

Formulación	Modelo	Discusión de resultado
I.- Arcilla (15 %), agua (7 %), arena fina (78 %). Se preparó 40 kg	Polea de madera	Muy bueno. Se realizó correctamente, el levantado del 2do piso
II.- Arcilla (12 %), agua (8 %), arena fina (80 %), Se preparó 40 kg	Polea de madera con orificios.	Regular. No se realizó correctamente, el levantado del 2do piso, porque el molde tenía orificios
III.- Bentonita (10,5 kg), agua (3,5 kg), arena fina (21 kg). Se preparó 35 kg	Logo de la UNSCH	Malo. No se pudo realizar el levantado del 2do piso. Se hizo el molde en el 1er piso
IV.- Arcilla (14 %), agua (8 %), arena fina (78 %)	Tecnopor. Engranaje IQ	Muy bueno. No hubo dificultades, porque el molde de tecnopor se quedó dentro de la arena
V.- Arcilla (1 parte), agua (10 %), arena fina (2 partes). Se preparó 30 kg	Moldes de yeso, arcilla quemada en Planta cerámica UNSCH	Bueno. No hubo dificultades, porque el molde de yeso y arcilla quemada se quedó dentro de la arena

Figura 6

Mejora del diseño de prototipos



En la Tabla 5 se presentan los materiales constituyentes de los modelos empleados y las dimensiones de los prototipos.

3.6. Caracterizar la materia prima

El aluminio es uno de los metales más usados en los envases de bebidas, gracias a su bajo peso específico, resistencia a la corrosión y su facilidad de reciclado. Es de color blanco plateado.

En la Tabla 6 se caracteriza la materia prima.

3.7. Eficiencia del proceso

Se realizaron varias pruebas para mejorar las adaptaciones y cambios en el horno basculante, teniendo en cuenta los cálculos necesarios para una mejor recuperación. En la Figura 7 se muestra la obtención de las piezas coladas, producto de la fundición, listas para el pulido, y en la Tabla 7 se detallan las mejoras y la eficiencia alcanzada.

3.8. Alimentación de combustible a gas y control automatizado

Se decidió realizar cambios para utilizar gas doméstico, lo que reduciría los costos relacionados con este insumo del proceso. Además, se diseñó y construyó el tablero de control automatizado. En la Figura 8 se muestra el tablero de control automatizado sincronizado con el suministro de gas combustible, mientras que en la Figura 9 se presenta una

foto del tablero de control, el alimentador de combustible y su aplicación. En la Tabla 8 se describe la alimentación de gas y su tablero de control.

3.9. Diagrama de bloques de la producción de piezas de aluminio

Se muestra el diagrama de bloques de la producción de piezas de aluminio, en la Figura 10

3.10. Cálculos realizados

Se utilizaron datos medidos directamente en el área y, en algunos casos, se recurrió a datos teóricos y a la consulta de textos especializados para este propósito.

3.11. Balance de materia usando como combustible el petróleo

Como resultado del procesamiento de los datos experimentales, se construyó la Tabla 9. De la carga total de la chatarra de aluminio en el horno, el 96.23 % corresponde al producto principal (fundición), el 3.77 % a la escoria, y el resto a pérdidas por factores como pérdida mecánica, humedad y polvos volátiles.

3.11.1. Cálculo de la carga y productos en el horno

Se toma el promedio de chatarra de aluminio depositado en el crisol, en la Tabla 9 se establecen los resultados tabulados.

Tabla 5

Recomendaciones en mejora del diseño de prototipos

N°	Descripción
1	Mejora de modelo usando tecnopor, o recipientes de productos en el mercado (lata de atún, pomada de betún, etc.). Modelo de madera del logo de la UNSCH
2	La cantonera metálica mide 12,5 cm de altura, 35 cm de largo y 30 cm de ancho.
3	Uso adecuado de equipos de protección personal (EPP)

Tabla 6

Recomendaciones para caracterizar la materia prima

N°	Descripción
1	Separación de los diferentes materiales de chatarra
2	Si la materia prima está oxidada, se extrae por lijado de la parte superficial.

Figura 7

Piezas obtenidas de la colada para eficiencia del proceso



Tabla 7

Recomendaciones en mejora del diseño de prototipos

N°	Descripción
1	Se realizaron los cálculos respectivos, utilizando como datos el peso de la materia prima y el peso del producto terminado. La diferencia entre estos dos valores se utiliza para calcular el peso de la escoria

Figura 8

Partes del quemador de gas para horno y tablero de control automatizado

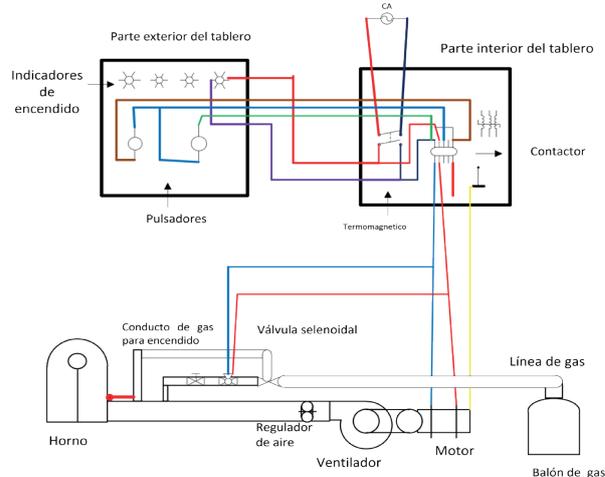


Figura 9
Alimentación de combustible a gas y control automatizado mediante el tablero



Tabla 8
Consideraciones en alimentación de combustible a gas y control automatizado

N°	Descripción
1	Adquisición de los accesorios y construcción del tablero de control en el taller mecánico.
2	Instalación del tablero de control en el equipo de fundición. h = 40 cm, a = 35 cm, e = 16 cm
3	Se puso en prueba el sistema de control automatizado usando como combustible el gas.

Figura 10
Flowsheet de la producción

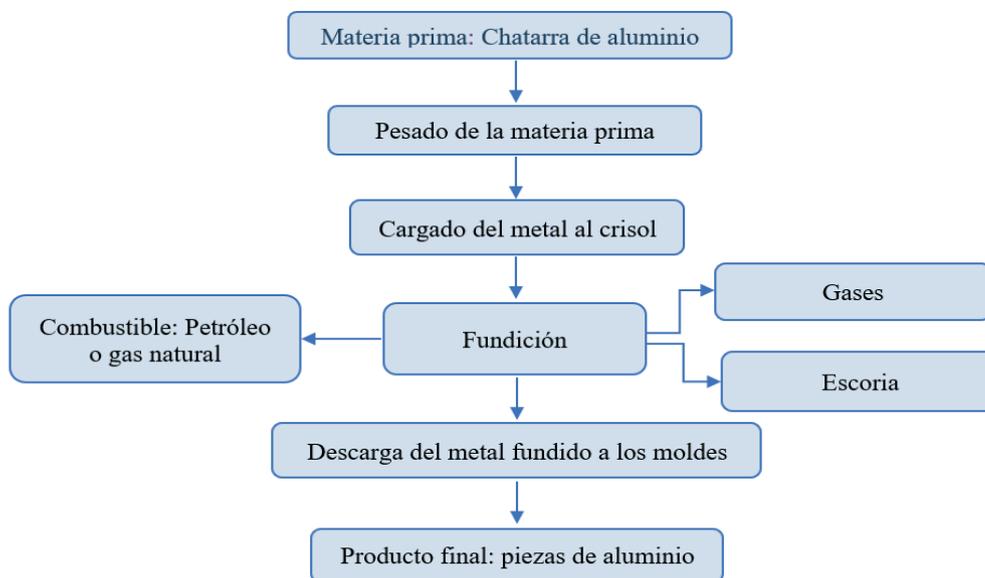


Tabla 9
Balance de materia en el proceso en Kg y %

	Chatarra de aluminio	Fundición	Escoria y otros
Peso, kg	3,900	3,753	0,147
%	100,00	96,23	3,77

a. Porcentaje de recuperación

$$3,753 \text{ kg} / 3,900 \text{ kg}) \times 100 = 96,23 \%$$

b. Cálculo del aire alimentado

En base a la cantidad de petróleo industrial gastado en la fundición de 3,90 kg de chatarra. Composición porcentual del petróleo (en peso): C = 84,66 %, H = 10,905 %, O = 2,78 % y S = 1,71 %.

Reacciones de combustión completa es:



Estequiométricamente, la cantidad de oxígeno necesario:

$$86,23 * \frac{(0,846)\text{kg C}}{12 \text{ kg C}} * 32\text{kg O}_2 = 194,53 \text{ kg O}_2$$

$$86,23 * 0,109 \text{ kg H}_2 * \frac{16 \text{ Kg O}_2}{2 \text{ kg H}_2} = 75,19 \text{ kg O}_2$$

$$86,23 * 0,0171 \text{ kg S} * \frac{32 \text{ Kg O}_2}{32 \text{ kg S}} = 1,48 \text{ kg O}_2$$

c. Cantidad de aire seco (peso)

$$\text{Pas} = 271,20 \text{ kg O}_2 * \frac{1 \text{ kg aire}}{0,21 \text{ kg O}_2} = 1 291,43 \text{ Kg}$$

Para calcular la cantidad de aire húmedo se usa la humedad relativa de la ciudad de Ayacucho 80 %, de tablas a 25 °C: presión de saturación 23.74 mm Hg, y presión atmosférica a 759 mm Hg. La fracción de agua en el aire se define por:

$$X = \text{Psat} (\text{HR} / \text{Patm})$$

Reemplazando los datos:

$$X = 23,74 * \frac{0,8}{759} = 0,025$$

Por lo tanto, la cantidad de aire húmedo es

$$\text{Pah} = \frac{1 291,44 \text{ Kg de aire húmedo}}{(1-0,025)} = 1324,543 \text{ kg de aire húmedo}$$

Volumen de aire húmedo alimentado:

$$\text{Va} = \frac{1324,553 \text{ kg de Aire húmedo}}{1,22 \text{ kg/m}^3} = 1085,690 \text{ m}^3 \text{ de aire húmedo}$$

Donde: densidad del aire es:

$$1,22 \text{ kg/m}^3$$

d. Cálculo de gases que salen del horno

Los gases que salen del horno con, CO₂, SO₂, O₂ y H₂O, haciendo los cálculos:

$$194,53 \text{ kg O}_2 * \frac{44 \text{ kg CO}_2}{32 \text{ kg O}_2} = 267,48 \text{ kg CO}_2$$

$$1,48 \text{ Kg O}_2 * \frac{64 \text{ Kg SO}_2}{32 \text{ Kg O}_2} = 2,96 \text{ kg SO}_2$$

$$75,19 \text{ Kg O}_2 * \frac{18 \text{ Kg H}_2\text{O}}{16 \text{ Kg O}_2} + (1 324,543 - 1 291,43) = 121,09875 \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$1291,44 \text{ Kggas} * \frac{0,79 \text{ Kg N}_2}{\text{Kggas}} = 1020,23 \text{ kg N}_2$$

$$86,23 \text{ Kggas} * \frac{0,0278 \text{ kg O}_2}{\text{Kggas}} = 2,39 \text{ kg O}_2$$

$$\text{Total} = 1414,15875 \text{ Kg de gas}$$

3.12. Balance general de materia (usando como combustible el petróleo)

En la Tabla 10 se detalla el balance de materia en la fundición con petróleo como combustible y en la Tabla 11 se detalla el resumen del balance de materia en Kg y %.

3.13. Balance de energía (usando como combustible el petróleo)

Utilizando la fórmula de Dulong (Gaffer, 1981)

$$Q = 8100 * C + 34000 * \left(\text{H} - \frac{\text{O}}{8} \right) + 2 220 * S - 586(9\text{H} + \text{W}) \quad (4)$$

Donde Q = poder calorífico en: $\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$

C, H, O, S y W, representan el % en peso de los cuatro elementos y la humedad del combustible.

$$Q = 8100 * 0,8460 + 34000 * \left(0,109 - \frac{0,0278}{8} \right) + 2200 * 0,0172 - 586(9(0,109) + 0,0)$$

$$Q = 9 903,42 \text{ Kcal/kg}$$

El calor total producido

$$Q = 9 903,42 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} * 0,8623 \text{ kg} = 8 539,71 \text{ kcal}$$

3.14. Balance general de materia (usando como combustible el gas)

En la Tabla 12 se indica el balance de materia fundida con gas combustible.

a. Porcentaje de recuperación

$$(10,551 \text{ kg} / 14,773 \text{ kg}) \times 100 = 71,42 \%$$

Datos: Peso latas usadas = 14,773 kg, gas usado = 4,451 kg, peso escoria = 3,928 kg,

Tiempo empleado = 1 hora y 40 minutos, temperatura de fusión = 660 °C

Peso piezas fundidas = 10,55 kg, peso bórax usado = 0,25 kg y densidad Aluminio = 2,79 g/cm³.

b. Calculando el aire alimentado

El GLP está compuesto por los siguientes constituyentes, el balance se detalla en la Tabla 13.

c. Cálculo del peso molecular de la mezcla (g/p)

$$M_{\text{Promedio}} = X_p * M_p + X_B * M_B + X_{MS} * M_{MS} \quad (5)$$

$$M_{\text{Promedio}} = 0,599 * \frac{44g}{\text{mol}} + 0,399 * \frac{58g}{\text{mol}} + 0,002 * 48g/\text{mol}$$

$$M_{\text{Promedio}} = 49,594 \text{ g/mol}$$

En la mezcla hay: 4C, 12 H y 1S.

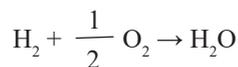
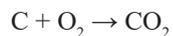
d. Composición porcentual

$$C = \frac{4 * \frac{12g}{\text{mol}} * 100\%}{49,594g/\text{mol}} = 96,79\%$$

$$H = \frac{12 * \frac{1g}{\text{mol}} * 100\%}{49,594g/\text{mol}} = 3,02\%$$

$$S = \frac{1 * \frac{32g}{\text{mol}} * 100\%}{49,594g/\text{mol}} = 0,19\%$$

Reacciones de combustión completa es:



Estequiométricamente: cantidad de oxígeno necesario:

$$4,451 * \frac{(0,9679)kg \text{ C}}{12 \text{ kg C}} * 32 \text{ kg O}_2 = 11,48 \text{ kg O}_2$$

$$4,451 * 0,0302 \text{ kg H}_2 * \frac{16 \text{ Kg O}_2}{2 \text{ kg H}_2} = 1,075 \text{ kg O}_2$$

$$4,451 * 0,0019 \text{ kg S} * \frac{32 \text{ Kg O}_2}{32 \text{ kg S}} = 0,008457 \text{ kg O}_2$$

$$\text{Total} = 12,56 \text{ kg O}_2$$

e. Cantidad de aire seco (peso)

$$P_{\text{as}} = 12,56 \text{ kg O}_2 * \frac{1 \text{ kg aire}}{0,21 \text{ kg O}_2}$$

$$P_{\text{as}} = 59,809 \text{ kg de aire seco}$$

Para calcular la cantidad de aire húmedo se emplea la humedad relativa de la ciudad de Ayacucho 64%, de tablas a 16,2 °C: presión de saturación 13,63 mm Hg, y presión atmosférica a 548 mm Hg.

La fracción de agua en el aire se define por:

$$X = P_{\text{sat}} (HR / P_{\text{atm}})$$

Reemplazando los datos:

$$X = 13,63 * \frac{0,64}{548} = 0,01592$$

Por lo tanto, la cantidad de aire húmedo es:

$$P_{\text{ah}} = \frac{59,81 \text{ kg de aire húmedo}}{(1-0,01592)} = 60,78 \text{ kg de aire húmedo}$$

Volumen de aire húmedo alimentado:

$$V_{\text{a}} = \frac{60,78 \text{ kg de Aire húmedo}}{1,22\text{Kg/m}^3} = 49,82\text{m}^3 \text{ de aire húmedo}$$

f. Cálculo de gases que salen del horno

Los gases que salen del horno con, CO₂, SO₂, O₂ y H₂O, haciendo los cálculos:

$$11,48 \text{ Kg O}_2 * \frac{44 \text{ kg CO}_2}{32 \text{ kg O}_2} = 15,78 \text{ kg CO}_2$$

$$0,008457\text{Kg O}_2 * \frac{64 \text{ kg SO}_2}{32 \text{ kg O}_2} = 0,017 \text{ kg SO}_2$$

$$1,075 \text{ Kg O}_2 * \frac{18 \text{ kg H}_2\text{O}}{16 \text{ kg O}_2} - (60,78 - 59,81) = 0,2394 \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$59,81 \text{ kggas} * \frac{0,79 \text{ Kg N}_2}{\text{Kggas}} = 47,24 \text{ kg N}_2$$

$$4,451 \text{ kggas} * \frac{0,021 \text{ Kg O}_2}{\text{Kggas}} = 0,0935 \text{ kg O}_2$$

$$\text{Total} = 63,37 \text{ kg de Gas}$$

3.15. Balance general (usando como combustible el gas)

$$\text{Donde } Q = \text{poder calorífico en: } \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

En la siguiente Tabla 14, se presenta el balance de materia en la entrada y salida. En la Tabla 15, se presenta el balance de materia en la entrada y salida en Kg y %.

C, H, O, S y W, representan el % en peso de los cuatro elementos y la humedad del combustible.

3.16. Balance de energía (usando como combustible el gas)

$$Q = 8\,140 * 0,969 + 2\,9000 * (0,0302 - \frac{0,00021}{8}) + 2,220 * 0,0019 = 8\,766,92 \text{ Kcal/kg}$$

Cálculo del poder calorífico del gas industrial, de un combustible seco:

El calor total producido

$$Q = 8\,140 * C + 2\,9000 * \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2\,220 * S \quad (6)$$

$$Q = 8\,766,92 * \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} * 4,451 \text{ kg} = 39\,021,56 \text{ kcal}$$

Tabla 10

Balance general de materia en Kg y %

Entrada			Salida		
Flujo		Masa, kg	Flujo		Masa, kg
Combustible		0,8623	Fundición aluminio		3,753
C	84,60 %	0,7295			
H	10,90 %	0,0940			
S	1,72 %	0,0148			
O	2,78 %	0,0240			
Chatarra aluminio		3,900	Escoria y otros		0,1470
Aire húmedo	80,00 %	13,2796	Gases de horno		14,1415
O	20,75 %	2,7555	CO ₂	19,20 %	2,7152
N	78,05 %	10,3647	SO ₂	0,21 %	0,0297
H ₂ O	1,20 %	1,594	N ₂	73,22 %	10,354
			O ₂	0,17 %	0,0240
Total		18,0419			18,0078

Tabla 11

Resumen balance general de materia usando como combustible el petróleo en Kg y %

Entrada			Salida		
Detalle	masa (kg)	%	Detalle	masa (kg)	%
Combustible (petróleo)	0,8623	4,78	Fundición aluminio	3,753	20,80
Chatarra de aluminio	3,900	21,62	Escoria y otros	0,1470	0,82
Aire húmedo	13,2796	73,60	Gases de horno	14,1415	78,38
Total	18,0419	100,00		18,0415	100,00

Tabla 12

Peso en el proceso en Kg y %

	Chatarra (envases gaseosa, cerveza)	Fundición	Escoria	Otros
Peso, kg	14,773	10,551	3,928	0,294
%	100,00	71,42	26,59	1,99

Tabla 13

Características generales de los componentes del GLP

Componentes	Propano (P)	Butano (B)	Metil mercaptano (MS)
Fórmula	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	CH ₃ SH
Peso molecular	44 g/mol	58 g/mol	48 g/mol
Composición volumétrica	59,9 %V	39,9 %V	0,2 %V
Composición molar	0,599	0,399	0,002

Tabla 14

Balance general de la materia, en Kg y %

Entrada			Salida		
Flujo		Masa (kg)	Flujo		Masa (kg)
Combustible		4,451	Fundición de aluminio		10,551
C	96,77 %	4,307			
H	3,02 %	0,134			
S	0,19 %	0,00845			
O	0,021 %	0,000935			
Chatarra de aluminio		14,773	Escoria y otros		4,222
aire húmedo	64 %	60,78	gases del horno		63,37
O	20,75 %	0,0935	CO ₂	25,90 %	16,41
N	78,95 %	42,24	SO ₂	0,03 %	0,019
H ₂ O	1,20 %	0,2394	N ₂	74,55 %	47,24
			O ₂	0,15 %	0,95
Total		80,004			78,14

Tabla 15

Resumen balance general de materia usando como combustible el gas, en Kg y %

Detalle	Entrada		Detalle	Salida	
	masa (kg)	%		masa (kg)	%
Combustible (gas)	4,451	5,56	Fundición aluminio	10,551	13,51
Chatarra de aluminio	14,773	18,47	Escoria y otros	4,222	5,40
Aire húmedo	60,780	75,97	Gases de horno	63,370	81,09
Total	80,004	100,00		78,143	100,00

IV. DISCUSIÓN

En las investigaciones realizadas por Niño (2012) y Kida et al. (2010), se emplearon hornos de crisol basculantes. Estos hornos resultaron ser una opción muy práctica debido a su movilidad, ya que están sostenidos por un sistema de soporte que permite inclinar el crisol alrededor de un eje horizontal sin necesidad de sacarlo de la carcasa metálica. Por otro lado, el horno de fundición de la UNSCH, al inicio de la investigación, también era basculante, pero posteriormente fue adaptado y acondicionado para convertirse en fijo.

En la investigación realizada por Kida et al. (2010), se menciona que el horno puede utilizar gas doméstico o gas licuado como fuente de energía. Un motor eléctrico impulsa aire a través de una turbina para la combustión, y para la fusión se utiliza un crisol de grafito de 8 kg. El calor se conduce a través de una espiral en la pared interior del refractario, y para evitar pérdidas de calor se utilizan áridos

a base de sílice y CaSO₄ como aislamiento. Se destaca que, para fundir 1 kg de aluminio, se requieren 10 minutos y 400 g de GLP, alcanzando una eficiencia del 72%. En el caso del horno de la UNSCH, este consta básicamente de una estructura exterior cilíndrica con una pequeña cavidad cilíndrica en su parte interior central. Sus paredes están formadas por tres partes: refractaria, aislante y revestidas con placas de acero. Puede utilizar petróleo, gas doméstico y gas licuado de petróleo, y el aire de combustión es impulsado por un ventilador con motor eléctrico. Utiliza un crisol de grafito con una capacidad de 13 kg, logrando una eficiencia del 71,4% cuando se utiliza gas como combustible.

En la investigación de Flores & Orellana (2014), se diseñó y construyó un horno de crisol con fines educativos e investigativos, con dimensiones compactas de 0,5 m de altura y 0,5 m de diámetro. Por otro lado, el horno de la UNSCH fue recientemente diseñado y reconstruido con

finés similares, utilizando un crisol de 25 cm de diámetro en la parte superior, 20 cm en la parte superior interna, 18 cm de ancho de la base y una altura de 35 cm, resultando en un horno de 0,47 m de altura y 0,55 m de diámetro.

La investigación de Alvayero & Huezco (2009) presenta el diseño final de un horno para fundición de aluminio de 300 lb de capacidad, mientras que, en el caso de la UNSCH, se presenta el diseño final de un horno de 32 lb de capacidad.

La investigación realizada por Mestanza & Lara (2012) tuvo como objetivo diseñar y construir un incinerador industrial para fundir aluminio reciclado con fines educativos. Se construyó un dispositivo con un diámetro de 65,7 cm y una altura de 62 cm, alcanzando una eficiencia del 79%. En el caso del horno de la UNSCH, se reconstruyó un dispositivo con un diámetro de 55 cm y una altura de 47 cm, logrando una eficiencia del 71,4%.

En la investigación de Quispe (2020), se trata del diseño y construcción de moldes permanentes de bronce para la fabricación de piezas de adornos de aluminio en desuso. Por su parte, en el horno de la UNSCH, se experimentaron con cinco formulaciones y técnicas de moldeo (Figura 11)

Con respecto a la evaluación de balance de materia y energía para los 2 casos de fundiciones a petróleo y gas, desde el punto de vista medioambiental, es mejor utilizar el gas. En cuanto a las distintas pruebas de moldeo (madera, madera con orificios, tecnoport, moldes de yeso, moldes de cerámica cocida), el que tuvo mejor acabado fue el de molde de cerámica cocida, mostrado en la Figura 12.

También se obtuvieron buenos acabados en los moldes utilizando madera sin orificios y tecnoport. Se recomienda continuar con las investigaciones, usando aleaciones de aluminio y otras con cobre, zinc, silicio, manganeso, magnesio, hierro, estaño, etc.

Las líneas de investigación que se abren son: el diseño de objetos utilizando el software ArtCAM, el uso de la máquina herramienta "Router CNC" para el mecanizado de cavidades de moldes y el montaje de moldes. Es posible producir adornos mediante fundición directa, con buen detalle y acabado superficial. Se logra producir objetos ornamentales por colada directa, obteniendo piezas con

buen detalle de superficie y acabado. Además, se puede desarrollar un plan de negocios para la creación de empresas en Ayacucho, dedicadas a la fabricación de productos de aluminio, usando como materia prima aluminio reciclado.

V. CONCLUSIONES

Se cumplió con el objetivo general de reconstruir y poner en funcionamiento el horno de crisol para la fundición de chatarra de aluminio. También se lograron los objetivos específicos, que incluían la evaluación de las etapas de reconstrucción, la modificación del diseño y funcionamiento del horno de crisol para la fundición de chatarra de aluminio, así como la obtención de piezas de productos terminados mediante diferentes técnicas de moldeo. Además, se realizaron los balances de materia y energía con petróleo y gas, cuyos resultados se presentan en la Figura 13.

En los balances de materia y energía con petróleo y gas, se demuestra que los gases producto de la combustión son más amigables con el medio ambiente al emplear gas doméstico, en comparación con el petróleo, que genera lluvias ácidas. Estos resultados se presentan en la Figura 14.

Se realizaron 4 pruebas con el equipo de fundición de la UNSCH, utilizando como combustible líquido DB2 y luego gas. En cada caso, las condiciones de trabajo, como la cantidad de materia prima (chatarra de aluminio), la cantidad de combustible, la humedad relativa y las condiciones ambientales de temperatura y presión de saturación, fueron diferentes. Se implementó un tablero de control automatizado para el uso de gas como combustible, lo que mejoró el proceso de fundición utilizando chatarra de aluminio con un alto porcentaje de recuperación. En términos de sostenibilidad y armonía con el medio ambiente, la combustión con gas es preferible.

Este trabajo se enmarca en el concepto de economía circular, donde una forma de reducir la contaminación asociada a la extracción del aluminio es mediante el reciclaje. El aluminio puede ser reutilizado un número incalculable de veces sin perder sus propiedades, lo que permite ahorrar alrededor del 90 % de la energía necesaria para producir aluminio a partir de la bauxita.

Figura 11
Formulaciones para obtención del molde, empleando gráfico de barras

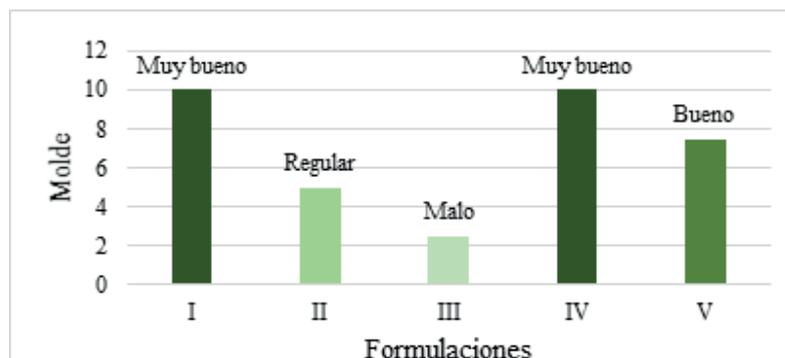
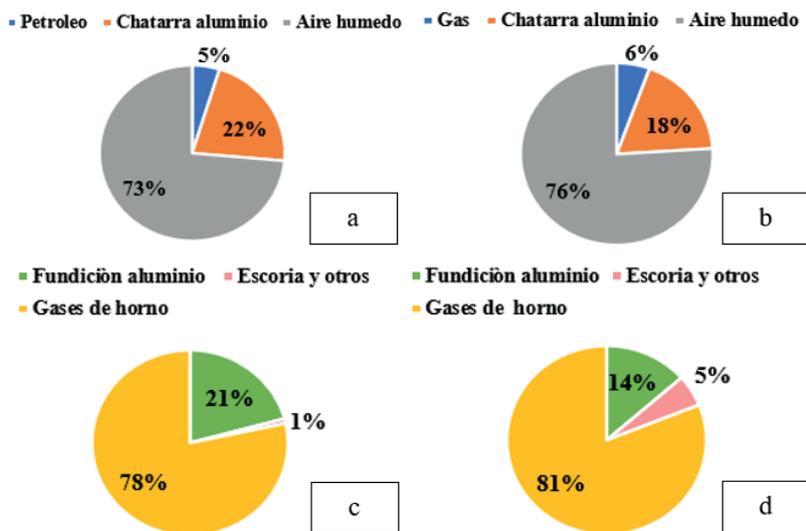


Figura 12
Producto final obtenido de un guerrero Wari, usando molde de cerámica cocida

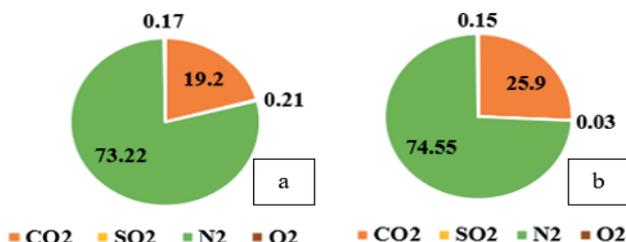


Figura 13
Balances de materias.



Nota: (a) entrada usando petróleo, (b) entrada usando gas, (c) salida usando petróleo y (d) salida usando gas.

Figura 14
Composición de los gases de combustión.



Nota: (a) petróleo y (b) gas doméstico.

VI. AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Experimentación Taller Electro Mecánico Holger K. Hanse, Ing. Aquiles López y a los estudiantes de Procesos Metalúrgicos de la UNSCH (Juan Pareja Q., Yuliano Robles B., Eder Aguilar P., William Contreras B., Katia Tineo C., Herlis Huallpa V., Marvin Huamaní O., Edgar Saume Z., Liz Quispe H., Ever Yaguillo C., William Barzola Q., Danny Vásquez de la Cruz, David Quintero V., Jhoan Godoy M., Anghely Lazo B., Lincoln Lizana

E., Lucy Misarayme C., Abraham Munaylla A., Jackeline Cotaquispe M., Vladimir Huamaní N., Nelson Ccanto L., Makengley Miranda R.)

VII. REFERENCIAS

Alvayero, J., & Huevo, C. (2009). *Diseño de un horno de fundición de aluminio*. [Tesis de grado]. Universidad Centro Americana "José Simeón Cañas", El Salvador.

- Antay, M., & Pfuero, B. (2022). *Diseño y construcción de un horno de crisol basculante para la fusión de aluminio para el laboratorio de fundición y moldeo de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica*. [Tesis de grado] Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/6783>
- Aquima, W., & Carlos, D. (2022). *Diseño y construcción de un horno de crisol basculante a gas natural para fusión de aluminio*. [Tesis de grado]. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/6508>
- Basilio, H., & Basilio, C. (2022). Sistema de reducción para colada en fundición de pequeñas cantidades de metales preciosos. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 25(49), 253-257. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i49.23010>
- Del Valle, C. (2021). Factores predominantes que afectan el medio ambiente por el uso de la resina furanica en moldes para la fundición de metales. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 24(48), 197-204. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21772>
- Dionicio, E., Vega, V., Tabuchi, E., Gonzáles, O., Rosario, S., Villacorta, L., & Dionicio, N. (2004). Influencia del molde y el tratamiento térmico en las propiedades del bronce-aluminio. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 7(14), 23-32.
- Fernández, A. (2019). *Instalación de una fábrica de perfiles en la Ciudad Puno, usando como materia prima aluminio reciclado*. [Tesis de grado]. Universidad Nacional del Altiplano, Perú. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/10480>
- Flores, E., & Orellana, R. (2014). *Diseño y construcción de un horno de crisol para aleaciones no ferrosas*. [Tesis de grado] Universidad de El Salvador, El Salvador.
- Gabriel, J. (2023). *Economía circular y el valor agregado de los minerales*. Lima: IX Congreso Internacional de Sostenibilidad Socioambiental en Metalurgia y Minería.
- Kida, J., Yupanqui, D., Sihua, C., Cabrera, J., & Farfán, J. (2010). *Horno de crisol MCJ para fusión de metales no ferrosos a GLP*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad.
- Mestanza, D., & Lara, V. (2012). *Diseño y construcción de un horno de combustión industrial para fundir aluminio*. [Tesis de grado]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1974>
- Niño, N. (2012). *Diseño y fabricación de un horno de fusión basculante para aleaciones no ferrosas, empresa J's Servipetrol LTDA*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Perez, F., & Soto, A. (2009). *Diseño, cálculo y construcción de un horno de fundición de aluminio tipo basculante y sus moldes*. Pamplona: Universidad de Pamplona.
- Quispe, R. (2020). *Diseño y construcción de moldes permanentes en bronce para fabricación de cabezas de león ornamentales de aluminio, en la empresa Fabrimetx, Espinar - Cusco*. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional del Altiplano, Perú. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/14524>
- Villacorta, H., Falconi, V., Rengifo, W., & Martínez, M. (2011). Influencia del cobre en la transformación Gamma-Alfa en la fundición gris y nodular-templabilidad. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 14(28).
- Zuñiga, A. (2023). *Economía circular y el valor agregado de los minerales*. Lima: IX Congreso Internacional de Sostenibilidad Socioambiental en Metalurgia y Minería.

Contribución de autoría

Conceptualización: Luis Cossío H., Abraham Trejo E.; Adquisición de fondos y recursos: Luis Cossío H., Abraham Trejo E.; Administración del proyecto : Luis Cossío H., Abraham Trejo E.; Supervisión y validación : Luis Cossío H., Abraham Trejo E., Ángel Davalos C.; Visualización: Luis Cossío H., Ángel Davalos C., Jorge Ortiz B.; Investigación : Luis Cossío H., Abraham Trejo E., Ángel Davalos C., Jorge Ortiz B.; Metodología y curación de datos : Luis Cossío H., Abraham Trejo E., Ángel Davalos C.; Software : Abraham Trejo E., Ángel Davalos C., Jorge Ortiz B.; Redacción - borrador original :Luis Cossío H., Ángel Davalos C., Jorge Ortiz B.; Redacción - revisión y edición : Luis Cossío, Abraham Trejo, Ángel Davalos, Jorge Ortiz

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.