

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE FUNDICIÓN PARA LA RECUPERACIÓN
DE MATERIAL METÁLICO A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO
METROPOLITANO DE QUITO: ENFOQUE EN LATAS DE ALUMINIO”**

Realizado por:

BERNARDA JÁUREGUI VÁSCONEZ

Directora de proyecto:

ING. KATTY CORAL CARRILLO MSC

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERA AMBIENTAL

Quito, Febrero 2021

DECLARACION JURAMENTADA

Yo, BERNARDA JÁUREGUI VÁSQUEZ, con cédula de identidad 1723123566, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

A rectangular box containing a handwritten signature in blue ink. The signature is cursive and appears to read 'Bernarda Jáuregui Vásquez'.

Bernarda Jáuregui Vásquez

1723123566

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

“CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE FUNDICIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE MATERIAL METÁLICO A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO: ENFOQUE EN LATAS DE ALUMINIO”

Realizado por:

BERNARDA JÁUREGUI VÁSCONEZ

como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERA AMBIENTAL

ha sido dirigido por el profesor

KATTY CORAL CARRILLO

quien considera que constituye un trabajo original de su autor

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Katty Coral Carrillo', is written over a light blue rectangular background.

FIRMA

LOS PROFESORES INFORMANTES

JOSÉ SALAZAR

MIGUEL MARTINEZ-FRESNEDA

Después de revisar el trabajo presentado,
lo han calificado como apto para su defensa oral ante
el tribunal examinador



FIRMA



FIRMA

Quito, 26 de febrero de 2021

DEDICATORIA

Dedicado a mis papas y hermana que con todo su amor, apoyo y esfuerzo incondicional me permitieron y ayudaron a cumplir esta meta.

AGRADECIMIENTO

A todos mis amigos y profesores de la UISEK que hicieron de mis años en la universidad una experiencia muy grata y aportaron a mi crecimiento profesional y personal.

RESUMEN

El presente proyecto se desarrolló con el propósito de elaborar una herramienta que facilite la recuperación de material a partir de los residuos sólidos del Distrito Metropolitano de Quito, fomentando así un cambio en la economía, hacia un sistema circular. El estudio se enfocó en el aluminio; cada tonelada de este metal obtenido de manera primaria, requiere el consumo de aproximadamente 14000 a 18000 kWh (Tominaga Terukina, 2013) y la producción de cada kilogramo de un lingote primario emite a la atmósfera aproximadamente de 8 a 22 kilogramos de CO_{2e}, dependiendo del lugar de producción del mismo (Collin, 2009), adicionalmente es un material que tarda en oxidarse alrededor de 400 años. El aluminio es un metal 100% reciclable, lo cual permite disminuir en un 95% el consumo energético y alcanzar propiedades del material similares al primario (ARPAL, 2013). El proyecto se enfocó en la recuperación de este metal, a partir de las latas utilizadas para la industria del empaquetado, residuo que en muchos países ya se recicla, alcanzando tasas de hasta el 85% de recuperación (Emison, n.d.), por otro lado, en Ecuador no es un material prioritario, al pensar en reciclaje. Se construyó un horno de crisol, al cual se le realizó monitoreo de temperatura, para evaluar su eficacia e n alcanzar la temperatura de fundición del aluminio, y, por otro lado, se calculó la tasa promedio de recuperabilidad del metal que genera el equipo, a partir de 3 pruebas de fundición de latas. Adicionalmente, se calculó el consumo energético y de combustible del horno, determinando de esta manera la huella de carbono, generada a lo largo del proceso de recuperación del material. El horno construido permite disminuir la cantidad de residuos que llegan al relleno sanitario del DMQ y principalmente es un método para recuperar material, ingresarlo nuevamente a la cadena productiva y disminuir la cantidad de recursos y energía que son utilizados para la obtención de nueva materia prima.

ABSTRACT

The following project was done with the purpose of developing a tool that makes easier the recovery of material from solid waste of Distrito Metropolitano de Quito, promoting this way a change in the actual economy towards a circular system. The study focused in aluminum, each ton of this metal obtained from primary extraction requires from 14 000 to 18 000 kWh of energy (Tominaga Terukina, 2013), producing to the atmosphere approximately 8 to 22 kilos of CO_{2e} per kilo of primary aluminum ingot, depending on the place it was processed (Collin, 2009), in addition is a material that taker 400 year to be oxidized. Aluminum is a metal 100% recyclable, which allows to decrease the energetic consumption in a 95% and reach in the path, similar properties from the primary material (ARPAL, 2013). The project emphasizes in the recovery of this material from cans used for the packaging industry, waste that in much countries is already been recycled, reaching rates of recovery of 85% (Emison, n.d.), in the other hand, in Ecuador cans are not consider a priority material for recycling. A crucible furnace was built, and temperature was monitored in relation to time, to assess the efficiency achieving in reaching the melting temperature of aluminum, also the average recoverability rate of the metal, generated by the equipment, was calculated from 3 can casting tests. In addition, was calculated the energy and fuel consumption of the furnace, thus determining the carbon footprint generated throughout the material recovery process. The furnace reduces the amount of waste that reaches DMQ landfills and it is mainly a method of recovering material, entering it into the production chain and reducing the amount or resources and energy used to obtain new raw material

1. INTRODUCCIÓN

En el Distrito Metropolitano de Quito se generan 0.842 kg de basura per cápita (EMASEO, 2015), de los cuales el 40% son residuos inorgánicos (Garzón, 2014) y aproximadamente el 1,2% es chatarra metálica (Castillo, 2012), lo cual representa 5916 toneladas de este tipo de materiales desechados al mes. Los impactos ambientales de los residuos metálicos en los rellenos sanitarios, se suman a los provocados a partir de los procesos de extracción y adecuación del material primario, entre los cuales destacan los grandes volúmenes de emisiones de gases de efecto invernadero resultantes del alto consumo energético.

Tomando el ejemplo del aluminio, como enfoque del estudio, se consumen de 14 000 a 18 000 kWh por tonelada de metal producido (Tominaga Terukina, 2013) y se generan aproximadamente 8 a 22 kilogramos de CO_{2e}, por cada kilogramo de lingote primario producido (Collin, 2009). El proyecto presenta una opción económica y eficiente para la recuperación de este metal, a partir de residuos de latas de envasado de bebidas. Con ayuda de un horno de fundición, se pretende dar una opción de reducción de este tipo de residuos en los rellenos sanitarios y adicionalmente reincorporar el material en la cadena productiva, disminuyendo la necesidad de extracción de nuevo material y todos los impactos que este proceso involucra.

La metalurgia es la técnica de obtención, preparación y tratamiento físico o químico de los minerales metálicos para producir metales de forma elemental y en aleaciones. Por lo general los metales se encuentran en la naturaleza combinados como óxidos o sulfuros, entre otros, y lo que buscan los procesos industriales extractivos es la obtención de estos metales puros o en forma de compuestos (Grau & Muñoz, 2013). La fundición es una forma de metalurgia extractiva, mismo que “implica” calentar y reducir la mena mineral con el propósito de obtener metal puro separándolo de la ganga y otros elementos (Lucendo, 2019). En general la industria de fundición y afino de materiales utiliza reacciones físico-químicas para la separación de

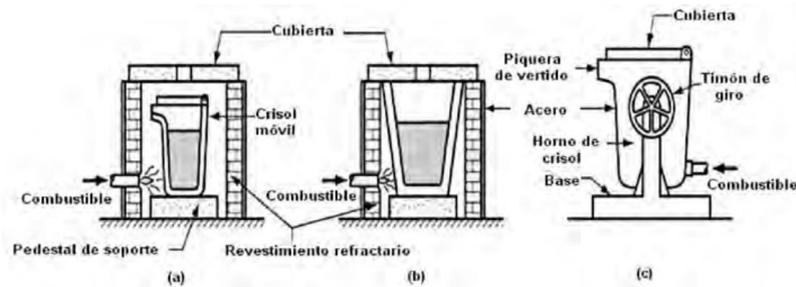
componentes metálicos valiosos de la materia inútil, obteniendo metal con impurezas controladas. La fundición se entiende también como la obtención de piezas, por colada y solidificación en molde, de una aleación metalúrgica o de un metal anteriormente llevado a estado líquido a partir del calentamiento por lo general en hornos (Suntaxi & Torres, 2014), proceso antes denominado como fundición secundaria.

El proceso primario obtiene material de los concentrados de minerales y el secundario lo obtiene a partir de la chatarra y residuos de la industria (McCann, 2012). El proceso de fundición secundaria abarca distintas etapas, inicialmente la fusión y tratamiento del metal, después la preparación de moldes, seguido por el llenado de los mismos, el enfriamiento y solidificación del material, en ese momento se realiza el desmolde y se puede dar el acabado a la pieza. El proceso puede variar en función del tipo de material, la serie y el tipo de producto, por ejemplo, en el caso de los metales de tipo férreo se utilizan moldes perdidos, como los de arena, y para los de tipo no férreo, moldes permanentes a presión (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010).

La fundición de los metales se la realiza en hornos, dependiendo la calidad requerida de la masa fundida, la productividad y la eficiencia energética se utilizan diferentes tipos de calentamiento (Nabertherm, n.d.). El calor para el calentamiento puede proceder de gases calientes generados a partir de la combustión de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos o por medio de energía eléctrica de distintas formas como el arco voltaico, inducción electromagnética, alta frecuencia, resistencia óhmica o por resistencias eléctricas que se calientan por efecto Joule (Emison, n.d.).

Los hornos de crisol son equipos utilizados para fusión de metales no férreos, en este, el metal se posiciona en el interior de un crisol generalmente elaborado de grafito o carburo de silicio. El crisol se coloca en el interior de una cámara de revestimiento refractario que permite la resistencia de calor, se lo puede posicionar de distintas maneras como se refleja en la Ilustración

1. El metal no estará en contacto con la fuente de calentamiento, es decir el calor se transfiere de manera indirecta, a través del crisol, por lo cual tiene pocas fuentes contaminación (Saltos & Vargas, 2009). Como en muchas operaciones de fundición se acumula escoria en la superficie, mientras el lodo pesado no fundido se queda en el fondo, estos reducen la vida útil del crisol, por lo que debe ser retirados y tratados como residuo o reciclados.



Tres tipos de hornos de crisol: a) Crisol móvil, b) Crisol estacionario o fijo, y c) Crisol basculante

Ilustración 1: Tipos de horno de crisol

(Calvo, 2015)

El aluminio (Al) es el tercer elemento más abundante en la Tierra, siguiéndole al oxígeno y el silicio, en ese orden, este elemento constituye más del ocho por ciento de la corteza terrestre. En situación normal, este metal forma compuestos químicos estables en forma de fosfatos o silicatos (Hernandez, 2016). El aluminio se obtiene de manera primaria inicialmente a través del proceso Bayer que consiste en la extracción de los minerales que contienen aluminio en la bauxita, se continua en las plantas de fundición es el proceso de Hall-Heroult, donde la alúmina es disuelta mediante un baño electrolítico de criolita (fluoruro de aluminio y sodio).

La producción primaria del aluminio trae consigo una alta gama de problemáticas ambientales; inicialmente la industria genera altos niveles de ruido durante el acondicionamiento de la bauxita, por otro lado, y uno de los principales impactos de la producción de este metal es la generación de residuos; durante la digestión de la bauxita se producen las escorias de esta roca que contienen silicio, hierro, titanio y calcio, que en su mayoría se quedarán en el suelo donde se extrajo el material. Durante el proceso de electrólisis, se generan PFC, CF₄ y C₂F₆ y durante

la tensión eléctrica de la misma se provocan reacciones que compiten entre sí, teniendo como resultado compuestos de CO₂, CO y fluoruros (Miner, s/f).

Por otro lado, la producción de aluminio por medio del proceso electrolítico requiere de mucha energía, es una de las industrias de mayor consumo a nivel mundial, alcanzando el 3% del total, utilizando alrededor de 300 billones de kilowatts por hora al año (Buffington, 2012). Es por esta razón que alrededor de 1600kg CO_{2e} son liberados a la atmósfera por cada tonelada de aluminio primario que se produce, de las cuales el 75% se generan durante el proceso de electrólisis (Tominaga Terukina, 2013).

El aluminio se considera como un material con elevado potencial de aprovechamiento, en consecuencia, se han implementado planes de reciclaje post consumo y post industriales que efectúan las ciudades (Delgado, Sanchez, & Olaya, 2015). Es un material 100% reciclable (ARPAL,2013) que puede generar hasta un 95% de ahorro energético en relación a la producción primaria y por lo tanto se genera tan solo un 5% de las emisiones regulares de CO₂ (LAYNA GROUP, 2013). En comparación con otros materiales de gran volumen, las dos formas de producción de aluminio son las de mayor diferencia energética, la producción primaria consume alrededor de 186 MJ por kilogramo del metal, mientras que la secundaria requiere de 10 a 20 MJ por kilogramo, lo que adicionalmente se refleja en disminuciones de costo y contaminación (Gaustad, Olivetti, & Kirchain, 2012).

Tabla 1: Propiedades del aluminio

PROPIEDADES ALUMINIO (Al)	
Propiedad	Valor
Masa atómica (g/mol)	26.9851
Densidad	2700 kg/m ₃
Punto de ebullición (°C)	2467

PROPIEDADES ALUMINIO (Al)	
Punto de fusión (°C)	660
Calor de fusión kJ/mol	10.79
Calor específico (Cp) J/gK	0.92 (0.23 cal/g °C)
Calor latente de fusión (γ) J/kg	395*10 ³ (94 Kcal/kg)

(Alu Stock, 2013)

Para incluir los residuos de aluminio en una nueva cadena productiva, es necesario dar tratamiento adecuado a las impurezas, cumpliendo así los requerimientos de calidad de la industria y adicionalmente controlar la composición química deseada del producto, lo cual se consigue separando los residuos según la familia del material, el tipo de producto y posteriormente fundiéndolos de manera independiente evitando mezcla de aleaciones (Delgado et al., 2015).

El aluminio se empezó a utilizar para la fabricación de latas después de la Segunda Guerra Mundial, y en 1963 la compañía The Reynolds Metals introdujo la primera lata completa de aluminio con el proceso de “dibujado y planchado”, convirtiéndola en la estándar de la industria. La lata actual es más liviana, no se oxida, se enfría rápidamente, tiene superficie brillante que facilita la impresión de diseños, tiene una vida útil más larga y es fácilmente reciclable (Advameg, 2020).

Las latas de aluminio están elaboradas por dos tipos de aleaciones, el cuerpo está hecho de una aleación suave 3004 que contiene 1% de manganeso y 1% de magnesio, haciendo que sea más fácil el moldeo, manteniendo un grosor de 0.004 pulgadas y permitiendo la producción de cinco cuerpos de lata por segundo. Por otro lado, la tapa es elaborada con aleación 5182, misma que contiene 4% de magnesio y 1% de manganeso, lo que la hace un aluminio más duro de dar

forma pero que ayuda a contener la presión de la bebida carbonatada y permite el sistema abre fácil. A pesar de la diferencia de las aleaciones los cuerpos y las tapas son reciclados juntos (Gordon, 2009). Los recipientes de bebidas elaborados de aluminio constituyen un tipo de chatarra único, debido que a pesar que los cuerpos y tapas sean elaborados a partir de distintas aleaciones, ambas contienen magnesio y manganeso por lo tanto pueden ser recicladas para la producción de ambas (Gordon,2009).

En Ecuador desde el 2015 se incursionó con el envase de bebidas en latas de aluminio, la Cervecería Nacional desde la ciudad de Guayaquil tiene una capacidad de producción de 40000 latas por hora, para el envasado de tres marcas, para lo cual importan la lata vacía (El Universo, 2015), otra de las envasadoras del país es Latable Canning Service, una empresa que desde el 2017 enfoca sus servicios al envasado de cervezas artesanales, energizantes, soda y cocteles, está importa 200 000 unidades de latas en presentaciones de 330 y 550 mililitros, misma que son en un 60% de material reciclado, la empresa tiene un promedio de 3500 latas envasadas al día (Líderes, 2019). Aproximadamente el 45% de aluminio importado a Ecuador proviene de Emiratos Árabes Unidos (Vega, 2012), la producción y comercio de aluminio en este país genera 21.9 kilogramos de CO_{2e} por kilogramo de un lingote de aluminio primario (Collin, 2009).

Se propone en el trabajo de investigación construir un horno de fundición para la recuperación de material metálico, a partir de residuos sólidos del Distrito Metropolitano de Quito, con un enfoque en latas de aluminio. Para lo cual, se plantea evaluar la funcionalidad del horno, por medio de pruebas de fundición de latas de aluminio y obtención de lingotes, determinando así su eficacia en la recuperación del metal. Adicionalmente se busca determinar la energía y combustible requerido para el accionamiento del horno, calculando los requerimiento y perdidas de calor, para de esta manera cuantificar las emisiones de CO_{2e} generadas por el horno de fundición. Por otra parte, se elabora un programa logístico de recolección de latas, a través

del estudio del ciclo de vida del envase, para lograr recuperar la mayor cantidad de aluminio dentro de la ciudad de Quito. Con lo expuesto anteriormente, se espera que el horno de fundición, sea un equipo eficiente para la recuperación de aluminio, a partir de los residuos de latas, con una tasa de recuperabilidad del metal del 70%, adicionalmente, se busca comprobar que la obtención de aluminio a partir del reciclaje genera menos emisiones que la producción primaria de este metal.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente trabajo se realizó la recolección de latas de aluminio de bebidas de diversas marcas, dentro del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), a través de la compra a recicladores de base y centros de acopio de material reciclado, adicionalmente se las obtuvo a partir del almacenamiento de los envases de un grupo pequeño de hogares que realizaron separación en fuente. Se procuró obtener las latas aplastadas, de manera que se las almacenó ocupando el menor espacio posible hasta el proceso de fundición.

Como se puede observar en la Ilustración 2, se continuó con la construcción del horno de fundición de crisol, este se elaboró utilizando materiales termo resistentes, en una base metálica, y su fuente de energía y calor es la quema de GLP. El horno listo fue sometido a 3 pruebas de funcionamiento; en las cuales, se realizaron mediciones de temperatura, cada dos minutos, a lo largo del tiempo de precalentamiento, que se delimita al llegar a los 660°C, esto se realizó mediante el uso de una termocupla con capacidad de 750°C, en un punto de control. Se analizaron y compararon las pruebas, con el fin de determinar la eficiencia de calentamiento del horno y el tiempo que requiere para alcanzar y estabilizarse en 660°C o más, obteniendo la fusión del aluminio.

Previo a la fundición se realizó una clasificación de las latas según su marca y volumen, se pesó 10 unidades de cada una, para obtener un peso promedio por tipo de lata, de esta manera se facilitó la contabilización de latas que ingresaron al horno posteriormente, y por tanto el cálculo de la masa que ingresó al mismo. Con esta información, adicionalmente, se pudo determinar la marca de latas más común, obtenida a partir de la recolección de residuos de latas en el DMQ.

Para la fundición se precalentó el horno, hasta alcanzar los 660°C aproximadamente y en este punto se inició a colocar las latas en el crisol, hasta observar que el licor de aluminio alcance los $\frac{3}{4}$ de capacidad del recipiente. Se finalizó el proceso de fundición del metal al colocar aluminio en estado líquido en un molde de hierro, y separando las escorias generadas en el proceso, en otro recipiente metálico. Al comparar la cantidad de masa que ingresa y el peso del lingote de aluminio y promediando este valor de las 3 pruebas, se calculó la tasa promedio de recuperación del metal, que puede genera el equipo, y adicionalmente las pérdidas que se generan en el proceso.

A partir de la implementación de la teoría de transferencia de masa y sus fórmulas, se calculó la cantidad de energía que requiere el equipo para la fundición del metal, posteriormente se determinó la cantidad de energía que se pierde a través de la estructura. Adicionalmente se estableció de manera teórica, la cantidad de combustible GLP que se requiere para generar fundición a lo largo de una hora de funcionamiento del equipo.

A partir del valor de consumo de combustible, se calculó la cantidad de emisiones directas de dióxido de carbono, que se generan del horno para la fundición, y adicionalmente se determinó las emisiones indirectas generadas a partir del consumo energético, transporte de materia prima y producción del GLP, por lo tanto, se obtuvo la huella de carbono del lingote de aluminio.

Finalmente se elaboró un programa logístico de recolección del material dentro del DMQ, donde se establecieron las posibles fuentes del material, las etapas de mayor volumen para la recolección y las estrategias de organización de las comunidades de recicladores y los centros de acopio. Además, se evaluaron las actividades esenciales que se deben realizar para optimizar el tiempo y disminuir los costos hasta llegar a la fase de fundición del material.

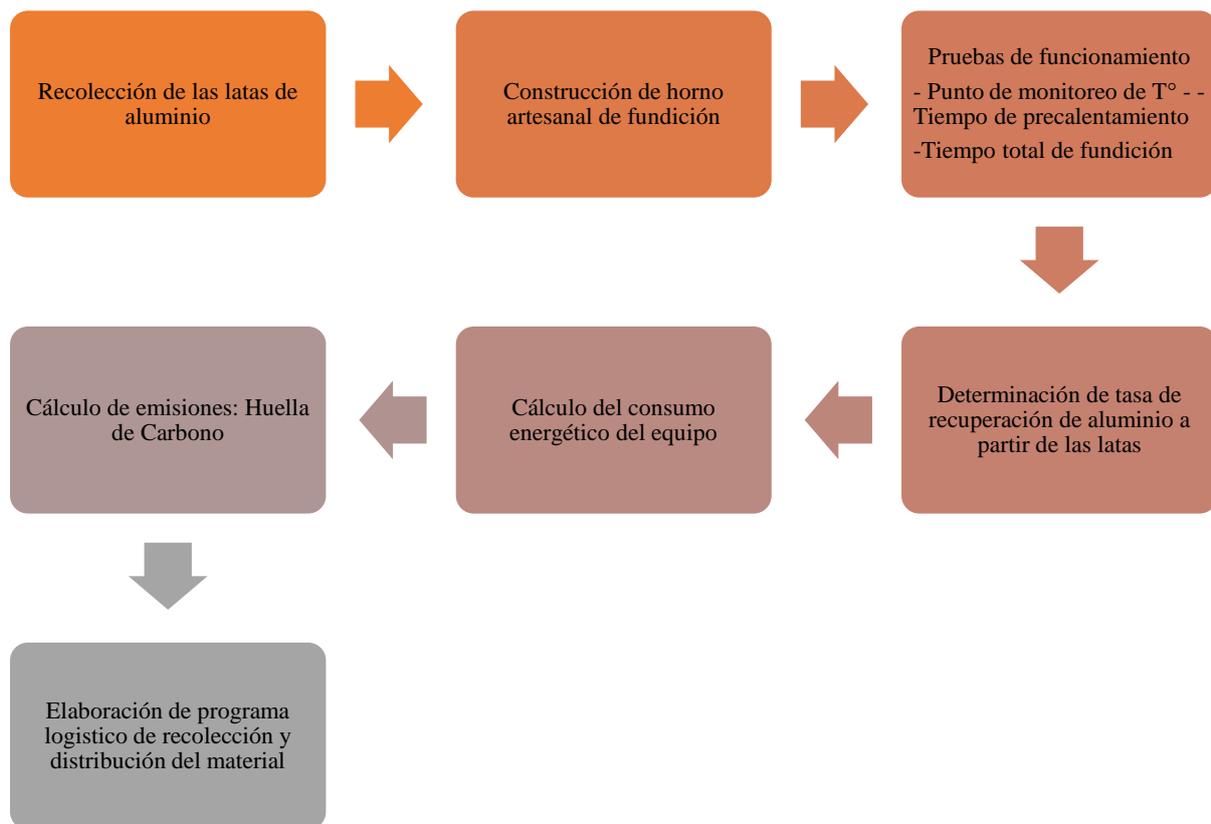


Ilustración 2: Diagrama de flujo de Metodología

Realizado por: Bernarda Jáuregui

3. RESULTADOS

3.1. Construcción del horno de crisol

3.1.1. Materiales

- Base metálica
- Ladrillos refractarios
- Cemento refractario
- Crisol de hierro (cucharón)
- Manguera
- Gas 15kg
- Molde de hierro

3.1.2. Equipos y Herramientas

- Soldadora
- Sierra
- Taladro
- Soplador
- Soplete
- Válvula

3.1.3. Equipos de medición

- Termocupla
- Multímetro
- Termómetro infrarrojo
- Cronometro
- Balanza

3.1.4. Proceso de construcción

- a) Seleccionar de una estructura metálica en forma de cilindro como base del horno.



- b) Adecuar los ladrillos refractarios dentro de la base metálica siguiendo su forma cilíndrica.



- c) Pegar de ladrillos con ayuda de cemento refractario, adecuándolos de manera estable en dos pisos.



- d) Adecuar el soplete a un extremo de la manguera, y la válvula al otro extremo, de manera que no exista fugas de gas.
- e) Perforar la estructura metálica, con un taladro, para adaptar del soplete en la abertura procurando que no existan aberturas por donde se pueda generar fuga de calor.



- f) Instalar el soplador a 5cm de distancia de la parte exterior del soplete, procurando que se mantenga fijo al encenderlo.



- g) Colocar el crisol, en la parte central baja de la estructura, como se puede evidenciar en el ejemplo (a) de la Ilustración 1, buscando que el soplete se dirija de manera directa a la parte inferior del mismo.

3.2. Dimensiones de Horno Finalizado

Tabla 2: Dimensiones horno

DIMENSIONES DE HORNO			
Símbolo	Medida	Valor	Unidad
mc	Peso de crisol	0.79	kg
Dc	Diámetro externo crisol	16.3	cm
hc	Altura crisol	13	cm
Vc	Volumen crisol	2712.74	cm ³
Lp	Longitud pared refractaria	47	cm
r0	Radio centro a pared externa crisol	8.15	cm
r1	Radio centro a pared interna crisol	7.75	cm
r2	Radio centro a pared interna refractario	11.5	cm
r3	Radio centro a pared externa refractario	17.9	cm
r4	Radio centro a pared metálica	18	cm

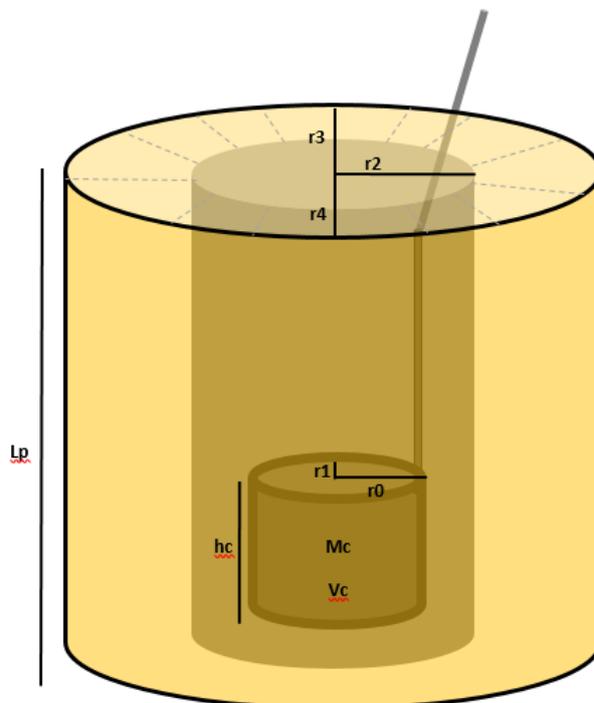


Ilustración 3: Diagrama de horno de fundición

Realizado por: Bernarda Jáuregui

En la Ilustración 3, se refleja un diagrama del horno de fundición construido, con las medidas finales, mismas que se pueden evidenciar en la Tabla 2.

3.3.Costo de producción del horno

Tabla 3: Costo de producción del horno

GASTOS DE CONSTRUCCIÓN				
Material	Cantidad	Unidad	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
Recipiente metálico	1	u	5	5
Ladrillos refractarios	28	u	2	56
Cemento refractario	4	kg	8	32
Crisol	1	u	30	30
Soplete	1	u	40	40
Manguera	4	m	1,5	6
Válvula	1	u	10	10
Soplador	1	u	25	25
Manómetro	1	u	15	15
Tanque de Gas	1	u	3,5	3,5
TOTAL			140	222,5

Realizado por: Bernarda Jáuregui

En la Tabla 3Tabla 3: Costo de producción del horno se refleja el valor total de 222.50\$ de construcción del horno de fundición artesanal. Los materiales que representaron la mayor cantidad de gastos son los ladrillos refractarios, siendo el 25.1% del total, seguido por el cemento refractario que representa el 14.38%.

3.4.Pruebas de funcionamiento

Tabla 4: Monitoreo de temperatura vs tiempo de horno

MONITOREO HORNO TEMPERATURA VS TIEMPO				
#	TIEMPO (s)	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3
		TEMPERATURA (°C)	TEMPERATURA (°C)	TEMPERATURA (°C)
1	2	27,2	35,0	33,0
2	4	72,8	68,9	120,0
3	6	112,2	162,2	175,2
4	8	121,1	222,2	183,0
5	10	132,8	261,1	206,6
6	12	212,8	346,1	339,0
7	14	260,6	423,9	446,0
8	16	271,1	482,8	508,3
9	18	279,4	518,3	583,0
10	20	290,6	550,0	605,1
11	22	356,7	581,1	616,0
12	24	381,1	598,3	631,0
13	26	392,8	610,0	640,0
14	28	446,7	645,6	653,0
15	30		656,1	659,0
16	32		676,7	664,0
17	34		686,1	674,0
18	36		696,1	689,0

Realizado por: Bernarda Jáuregui

En la Tabla 4 se refleja el monitoreo de temperatura realizado en las tres pruebas de funcionamiento del horno. La primera prueba tuvo un tiempo de duración de 28 minutos, durante los cuales se alcanzó una temperatura máxima de 446.7°C, por lo tanto, no se alcanzó la temperatura deseada, esto se debió a que no se esperó el tiempo adecuado, como en las otras pruebas y principalmente a que el soplete y soplador estaban ubicado en la parte superior de la estructura, evitando que se retenga suficiente calor. Estos resultados permitieron tomar la

decisión de modificar el ingreso de calor y aire a la parte lateral baja de la estructura, evidenciándose mejoras en la captura de calor del horno.

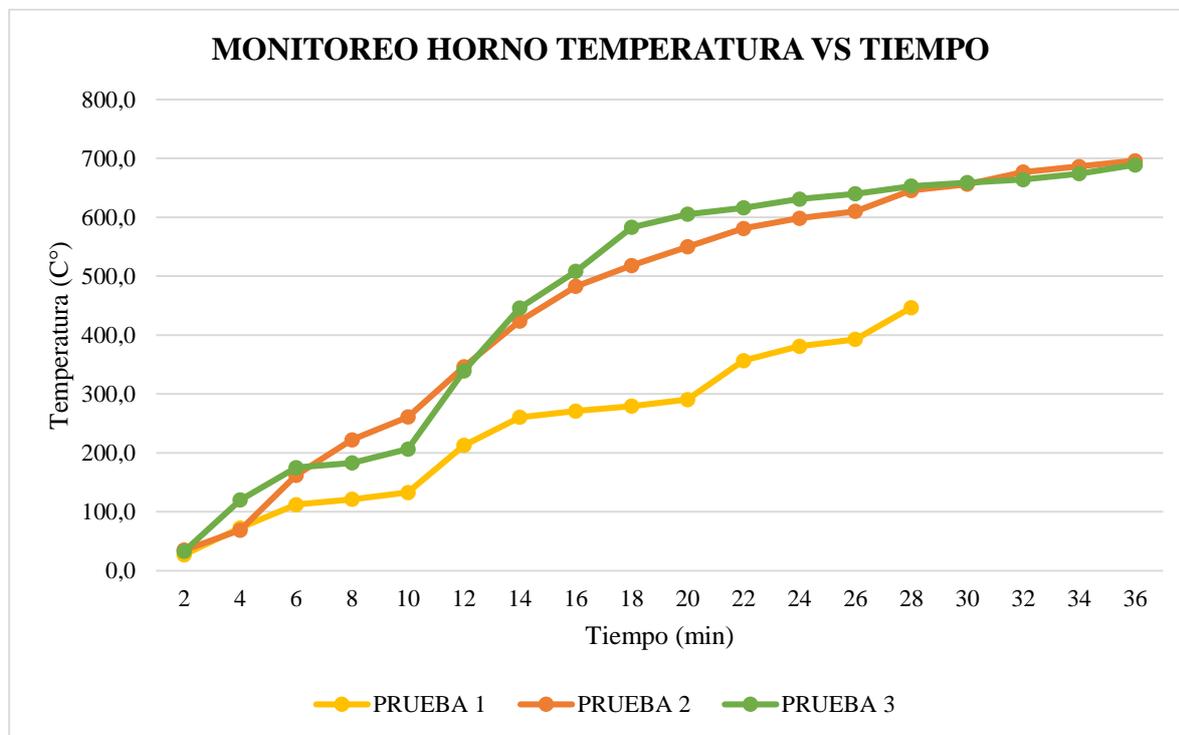


Ilustración 4: Monitoreo temperatura en relación del tiempo

Realizado por: Bernarda Jáuregui

En la Ilustración 4 y Tabla 4 se refleja lo sucedido durante las pruebas 2 y 3, en las cuales se superó el valor de 660°C esperados, y en ambas se llegó a dicha temperatura, aproximadamente a los 30 minutos de calentamiento de la estructura.

El valor máximo de temperatura, determinado durante el período de pre calentamiento, fue de 696.1°C, que se dio durante la segunda prueba.

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO		
Prueba	Observaciones	Mejoras implementadas
1	<p>Las latas se deshacen pero no cambian a estado líquido. Por lo cual aumenta la cantidad de escorias.</p> <p>El calor se dispersa.</p> <p>El soplete se desgasta debido a que la llama tiende a subir, por lo cual disminuye el tiempo de vida del material.</p> <p>Es difícil colocar las latas debido a la proximidad de la llamada a la zona de acceso de las latas.</p>	<p>Soplete y soplador movido a parte lateral inferior de la estructura.</p> <p>Esperar más tiempo de precalentamiento.</p> <p>Colocar el soplador más cerca del soplete.</p> <p>Procurar tapar el horno en su totalidad.</p> <p>Se debe hacer una preclasificación de las latas para una cuantificación más sencilla.</p>
2	<p>El crisol se torna rojo debido a las altas temperaturas.</p> <p>Las latas se funden más rápido al colocarlas en el horno de manera compactada.</p>	<p>Colocar el crisol más cerca de la fuente calor.</p> <p>Durante el período de pre calentamiento mantener el mayor tiempo posible la estructura tapada.</p> <p>Aumentar el flujo de gas en el soplete.</p> <p>Se debe verter el aluminio líquido rápidamente en el molde, evitando colocar en dos partes, debido a que se torna sólido rápidamente.</p>
3	<p>Las latas con más colores en su etiquetado generan otro tipo de gases de combustión.</p> <p>El desmolde se facilita cuando la parte inferior del mismo es de menor superficie que la parte superior y abierta del mismo</p>	

Realizado por: Bernarda Jáuregui

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se detalla lo observado en cada una de las pruebas y las mejoras que se implementaron, a consecuencia de las fallas identificadas. Se puede evidenciar que la Prueba 1, fue donde se encontraron la mayor cantidad de deficiencias en el horno y por lo tanto se efectuaron diversos cambios en la estructura, los mismos que permitieron que las siguientes pruebas sean exitosas en alcanzar la temperatura de fundición. A lo largo de las Pruebas 2 y 3 se identifican mejoras de proceso en comparación a las de la Prueba 1 que son más de estructura del equipo.

Tabla 5: Tiempos de funcionamiento horno

TIEMPO DE FUNCIONAMIENTO DE HORNO		
Prueba	Tiempo de pre calentamiento (min)	Tiempo de fundición (min)
2	36	68
3	36	78
PROMEDIO	36	73

Realizado por: Bernarda Jáuregui

Para obtener el tiempo de funcionamiento del horno que se refleja en Tabla 5, se tomó en cuenta las pruebas que alcanzaron la temperatura requerida para fines de recuperación de aluminio, es decir, las que superaron los 660°C. Por lo tanto, son las pruebas 2 y 3 de la Ilustración 4 y Tabla 4 anteriormente detalladas.

Se determina un tiempo de pre calentamiento promedio de 36 minutos y un tiempo de fundición en general de 73 minutos, este considera el tiempo de pre calentamiento y el tiempo que tomó la fundición de las latas.

Tabla 6: Tipo y cantidad de latas utilizadas por prueba

PESOS POR MARCA DE LATA								
Marca	Volumen (cm ³)	Peso (g)	1ra Prueba		2da Prueba		3ra Prueba	
			Cantidad	Peso	Cantidad	Peso	Cantidad	Peso
Budweiser	269	11.5	56	644	53	609.5	-	-
Pilsener	355	13	67	871	93	1209	82	1066
Coca Cola	355	13	-	-	-	-	12	156
Club	355	13	29	377	-	-	31	403
Pilsener	269	11	60	660	-	-	-	-
Pilsener	473	15	15	225	17	255	70	1050
Monster	473	15	-	-	-	-	14	210
TOTAL	2549	91.5	227	2777	163	2073.5	195	2675

Realizado por: Bernarda Jáuregui

Para determinar la cantidad de latas y por lo tanto la masa de las mismas que ingresa al horno, se realizó una clasificación por marca y volumen de envase como se puede visualizar en la Tabla 6. Podemos evidenciar que en la Prueba 3, es donde se utilizó la mayor cantidad de latas y, por lo tanto, el máximo ingreso de masa al horno. Durante esta prueba, el crisol alcanzó un 85%, aproximadamente, de su capacidad total en volumen, considerando el licor de aluminio y las escorias generadas.

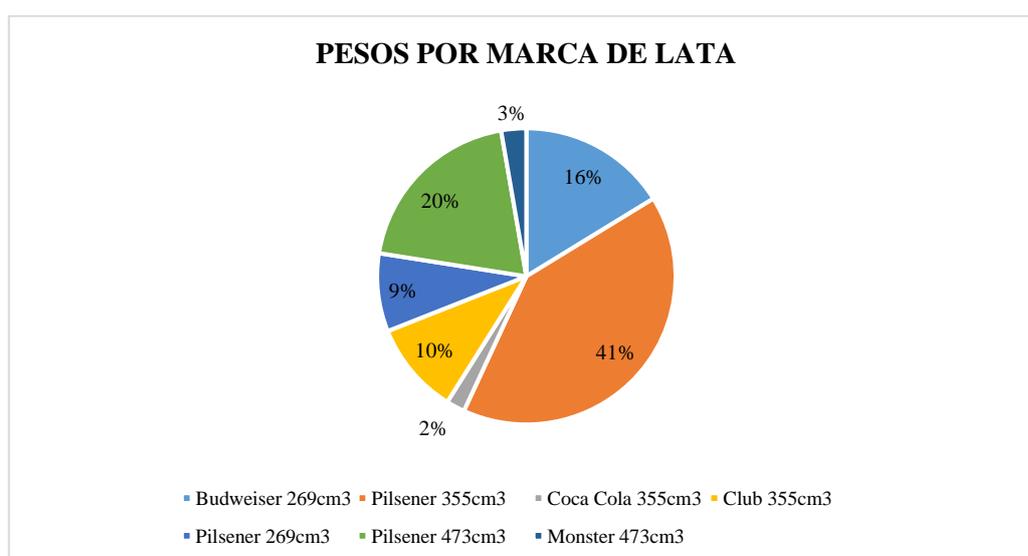


Ilustración 5: Marcas de latas utilizadas

Realizado por: Bernarda Jáuregui

Como se refleja en la Ilustración 5, a partir de la clasificación realizada se determinó que el envase mayormente utilizado para las pruebas fue el de Pilsener de 355cm³ alcanzando un 41% de toda la masa, y seguida por la Pilsener de 473cm³, la cual representa el 20%. El envase 355 cm³ representa la mayoría, a pesar de no poseer el mayor peso por unidad, debido a que en cantidad es representativamente mayor.

Tabla 7: Tasa de recuperación de aluminio

TASA DE RECUPERACIÓN DE ALUMINIO					
PRUEBA	MATERIA PRIMA	MATERIAL RECUPERADO	ESCORIAS	RESIDUOS EN CRISOL	TASA DE RECUPERACIÓN
#	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)	%
2	2073.5	1356	568	149.5	65%
3	2675	1886	429	360	71%
PROMEDIO	2374.3	1621.0	498.5	254.8	68%

Realizado por: Bernarda Jáuregui

Para la obtención de la tasa de recuperación se tomó en cuenta las pruebas donde se alcanzó el punto de fundición del aluminio y donde se pudo observar el cambio de estado del material, por lo tanto, se consideraron las Pruebas 2 y 3 del estudio.

En la

Tabla 78, se refleja que, para la obtención de un lingote de aluminio en el horno de fundición en estudio, en promedio, se debe colocar 2374.3g de latas, de esta cantidad y posterior al proceso de fundición se obtiene un lingote de 1621g, en promedio, lo cual quiere decir que el horno permite recuperar un 68% del aluminio a lo largo de su funcionamiento.

Adicionalmente, se pudo determinar que a lo largo del proceso se generan en promedio 498.5g de escorias, lo cual representa el 21% del total de la masa de ingreso y el resto de material no

contabilizado se consideró como pérdida o residuo en el crisol, el cual en promedio representa un 11% del total de la masa de latas colocadas.

3.5.Cálculo de consumo energético

Aplicando las propiedades físicas del aluminio, detalladas en la Tabla 1, y tomando en cuenta las dimensiones del horno presentadas en la Tabla 2, se calcula el consumo energético y de combustible del horno, a través de la implementación de fórmulas de transferencia de masa.

Los cálculos se pueden observar en el Anexo 8.6.

Tabla 8: Resumen de resultados calculados

DATOS CÁLCULOS			
Simbolo	Dato	Valor	Unidad
Q1	Calor requerido para elevar T de 20°C a 660°C	348,86	kcal/h
Q2	Calor requiero para el cambio de fase	222,78	kcal/h
Q3	Calor requerido para alcanzar T de fusión	17,72	kcal/h
(Qcarga metálica)	Carga metálica	589,36	kcal/h
Qac	Calor absorbido por el crisol	56,84	kcal/h
Qk	Calor total de fundición	751,54	W
RTk2	Resistencia material refractario	0,3	°C/W
RTk3	Resistencia material metálico	0,000035	°C/W
RTc	Resistencia aire de la cámara	0,16	°C/W
Qp	Flujo de calor perdido	1463,21	W
QT	Energía total utilizada	1904,24	kcal/h
mg	Cantidad de combustible (GLP) requerido durante tiempo de funcionamiento horno	8,5	kg/h

Realizado por: Bernarda Jáuregui

La Tabla 8 resume los resultados de los cálculos realizados; se observa que se requiere 646.21 kcal/h de calor (Q_k) para calentar el horno hasta la temperatura de fundición del aluminio, del cual el 53.98% es requerido para elevar la temperatura de 20°C a 660°C, el 37.8% para el cambio de fase, el 8.8% es absorbido por el crisol y tal solo el 2.74% para alcanzar el punto de fusión. Adicionalmente se evidencian las resistencias de los distintos materiales del horno, siendo los ladrillos refractarios los presentan la mayor capacidad de soportar esfuerzos y fuerzas. Del total de energía utilizada, es decir 1904.24 kcal/h, el 66% es flujo de calor perdido, lo cual refleja que existe una oportunidad de mejora en el horno para incrementar la eficiencia en el calentamiento del mismo y la disminución de consumo energético.

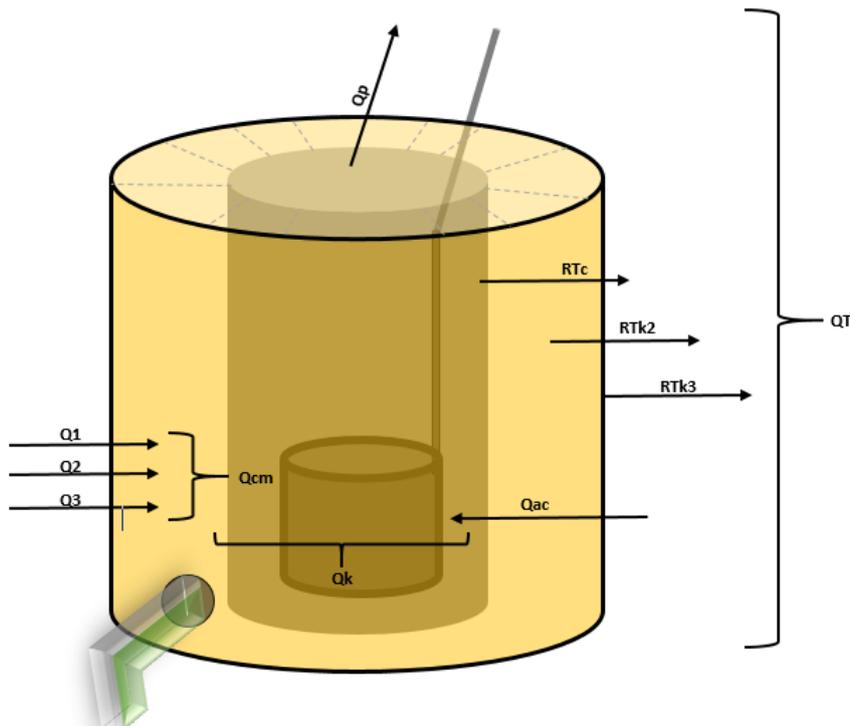


Ilustración 6: Diagrama de flujo de energías

Realizado por: Bernarda Jáuregui

En la Ilustración 6 se refleja un diagrama del flujo de energías calculado y resumido en la Tabla 8. En este se puede observar las entradas y salidas de calor del horno, y las respectivas sumas de las mismas, para la obtención del consumo energético total, simbolizado como QT.

3.6.Cálculo Huella de Carbono

El cálculo de la Huella de Carbono se realizó siguiendo los estándares de la ISO 14067 y la metodología del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). Se calculó la Huella de Producto de un lingote de aluminio de 1.621kg, considerando el peso promedio de aluminio recuperado a través del horno.

Se realizó la cuantificación y análisis de la huella de carbono del lingote de aluminio producido en el horno de fundición en estudio, lo cual permitió comparar el impacto de contaminación de aire del mismo, con un lingote producido de manera primaria.

Se consideró el ciclo de vida del producto desde la producción de los equipos y la materia prima hasta la obtención del lingote antes de su venta, omitiendo de esta manera las emisiones generadas por el uso y la disposición del mismo.

Las emisiones por producción de la lata de aluminio fueron consideradas 0 debido a que, al ingresar en el sistema, estas ya son consideradas desechos. Por otro lado, se excluyó las emisiones generadas por la elaboración del horno, debido a que es un equipo que se utilizará indefinidamente y sus emisiones por lingote son consideradas irrelevantes para el cálculo.

3.6.1. Emisiones por quema de GLP

Se calcularon las emisiones por quema de GLP, siendo estas las únicas directas durante la obtención del lingote de aluminio. Se pueden observar los cálculos en el Anexo 8.7.1.

Tabla 9: Emisiones por combustión de Gas Licuado de Petróleo

Combustible	Poder Calorífico	Unidad	Emisiones por tipo de gas		
	TJ/unidad		kgCO ₂ /TJ	kgCH ₄ /TJ	kgN ₂ O/TJ
Gas Licuado de Petróleo	0.0001046	TJ/gal	63100	1	0.1

(IPCC,2006)

La Tabla 9 refleja el valor de poder calorífico y las emisiones estándar establecidas por el IPCC para el cálculo de emisiones de CO_{2e} de la quema de GLP, los cuales se aplicaran en la fórmula establecida por la misma institución.

Tabla 10: Potenciales de calentamiento global por tipo de gas

POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (100 años)	
Gas	PCG
CO ₂	1
CH ₄	30
N ₂ O	265

(IPCC,2006)

La Tabla 10 contiene los potenciales de calentamiento global para 100 años de los gases de efecto invernadero emitidos por la quema de combustibles y que permitirán calcular las emisiones del GLP en una sola unidad; CO_{2e}.

3.6.2. Emisiones por consumo de energía

El equipo con consumo energético utilizado para el funcionamiento del horno es el Soplador, por lo cual se realizó el cálculo de emisiones a partir la cantidad de energía requerida por el equipo y el tiempo de uso del mismo.

Para realizar el cálculo, se tomó en cuenta el valor de factor de emisión de la matriz energética de Ecuador para el 2019, que es un buen aproximado para el valor del 2020, el cual todavía no es calculado. Se pueden observar los cálculos en el Anexo 8.7.2.

Tabla 11: Potencial y tiempo de uso de equipo eléctrico

USO EQUIPOS ELÉCTRICOS		
Tipo	Potencia (W)	Tiempo de uso (min)
Soplador de aire DWD50100	650	73

Realizado por: Bernarda Jáuregui

En la Tabla 11 se reflejan las características y tiempo de uso del equipo eléctrico requerido para el funcionamiento del horno de fundición, estos datos son requeridos para calcular las emisiones indirectas por consumo energético del equipo.

3.6.3. Emisiones por transporte de latas a lugar de fundición

Para realizar este cálculo de emisiones por transporte se utiliza el kilometraje de distancia que brinda Google Maps, entre la principal fuente de recolección y el lugar donde se ejecutó la fundición, es decir desde la Av. de las Palmeras y El Inca hasta la Calle V de la Urbanización El Condado. La distancia recorrida entre estos puntos es de 10.8 km, en un vehículo Chevrolet Vivant, por lo cual se utiliza el rendimiento de este modelo de vehículo para cálculo. Se encuentran los calculo en el Anexo 8.7.3.

En caso de cambiarse el lugar de la fuente de recolección y la zona de fundición se debe hacer un recalcu de la distancia y por lo tanto de las emisiones.

Tabla 12: Emisiones por combustión de gasolina

Combustible	VCN / Poder calorífico	Unidad	Emisiones por tipo de gas		
	[TJ/unidad]		kgCO ₂ /TJ	kgCH ₄ /TJ	kgN ₂ O/TJ
Gasohol / Gasolina	0.000126	TJ/gal	69300	33	3.2

En la Tabla 12, se presenta el poder calorífico de la Gasolina, al igual que las emisiones estándares por tipo de gas generadas por la quema de este combustible, mismas que son multiplicadas por lo potenciales de calentamiento de la Tabla 10, para el cálculo de emisiones en CO₂e.

3.6.4. Emisiones por producción de GLP

Se toman en cuenta las emisiones por producción del GLP como parte de la cuantificación de huella del producto, debido a que es uno de los recursos principales para el funcionamiento del equipo y por su constante rotación en la producción en el proceso de fundición, es decir que, es un insumo de constante uso y por lo tanto tendrá repercusión directa en las emisiones de cada unidad de lingote. Se reflejan los cálculos por consumo de GLP en el Anexo 8.7.4.

Otros insumos del equipo, como los materiales de construcción no son tomados en cuenta para el cálculo de emisiones indirectas debido a que son recursos fijos, por lo tanto, las emisiones de su producción se contabilizan una sola vez y se las divide para todas las unidades producidas, tornándolos irrelevantes. Según la ISO 14067, al no considerarse relevantes, pueden no ser contabilizados en el cálculo.

3.6.5. Emisiones Totales

Las emisiones 1 y 2, están calculadas durante el periodo de tiempo promedio de funcionamiento del horno determinado en la Tabla 5, es decir 1.21 horas.

Tabla 13: Emisiones totales generadas

EMISIONES GENERADAS				
Categoría	Fuente	Tipo	Emisiones (kg CO2e)	Emisiones (Ton CO2e)
1	Directa	Combustible	28,208	0,028
2	Indirecta	Energía	0,060	0,000
3	Indirecta	Trasporte de latas	1,972	0,002
4	Indirecta	Producción de GLP	3,090	0,003
TOTAL			33,330	0,033

Realizado por: Bernarda Jáuregui

A partir de los resultados de la Tabla 13, determinamos que; la Huella de Producto de un lingote de aluminio de 1.621kg, obtenido a partir de fundición de latas de aluminio en el horno en estudio, durante un período de tiempo de 1.21 horas, es de 0.033 toneladas de CO_{2e} o 33.33 kg de CO_{2e}.

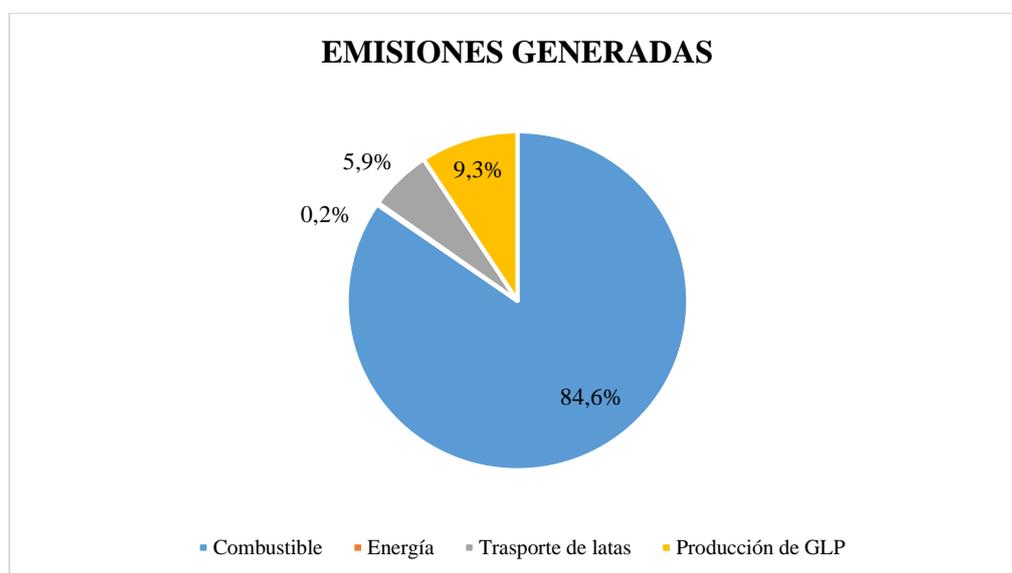


Ilustración 7: Emisiones por tipo de fuente

Realizado por: Bernarda Jáuregui

En la Ilustración 7 evidenciamos el porcentaje que representan cada tipo de fuente de emisión analizada para el cálculo de la huella. El 84.6% de las emisiones generadas son a partir de la única fuente directa, es decir la quema de GLP, la segunda fuente principal de emisiones es la producción de GLP, la cual representa un 9.3%.

3.7. Programa Logístico de Recolección

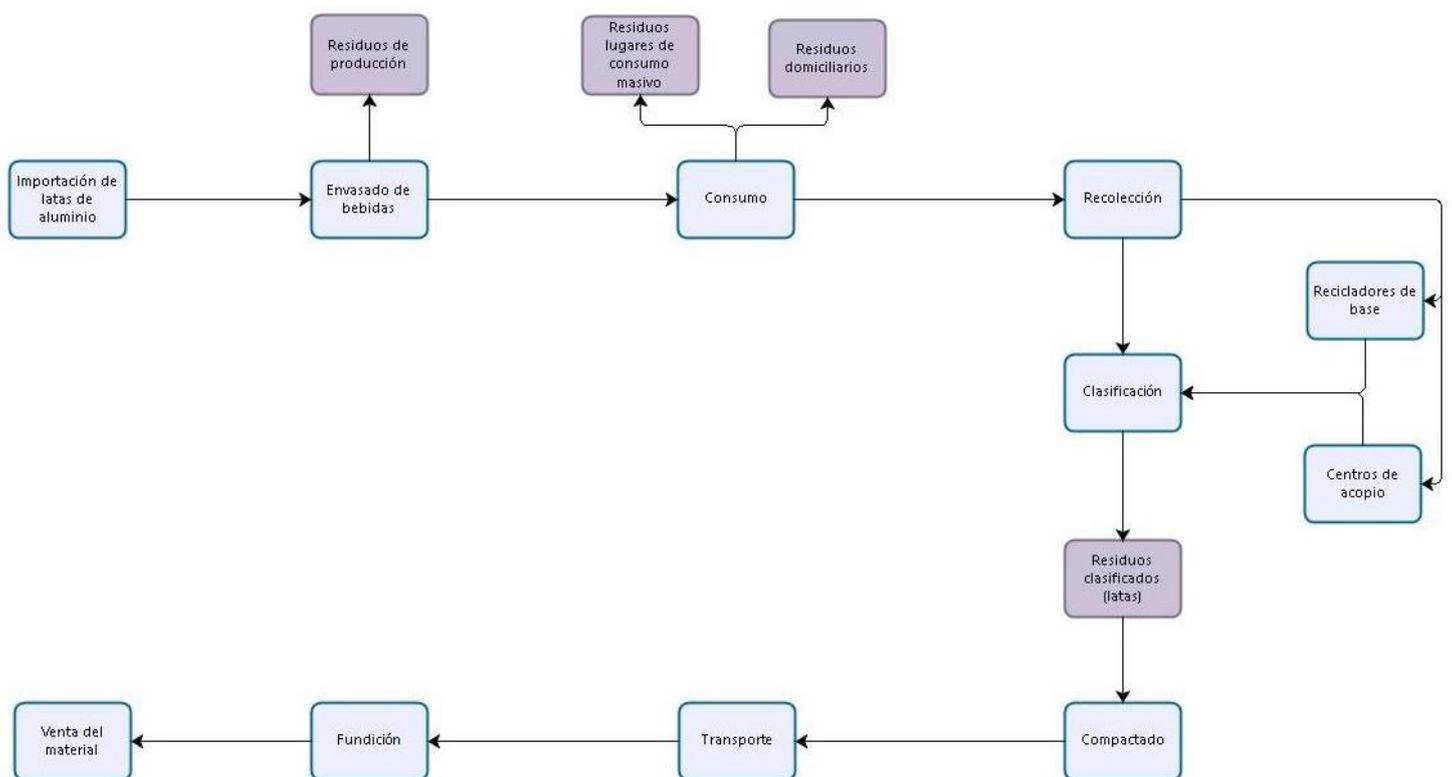


Ilustración 8: Diagrama de flujo de Programa Logístico

Realizado por: Bernarda Jáuregui

En la Ilustración 8, se presenta el flujo del programa logístico, planteado para la recolección de latas de aluminio en la ciudad de Quito, el mismo que muestra de color celeste las fases del ciclo del vida de este envase, considerando un proceso de reciclaje, y se muestra de color morado donde se generan residuos, que en este caso, son considerados la materia prima para el funcionamiento del horno en estudio.

3.7.1. Fases del Programa

3.7.1.1.Importación y envasado

Debido a la falta de industria dedicada a la producción de latas de aluminio para envasado de bebidas en Ecuador, este producto es importado de distintos países. Las latas llegan a su destino en dos piezas, el cuerpo y la tapa, mismas que ingresarán al proceso de envasado de las distintas marcas de bebidas del país. El líquido, por lo general carbonatado, es colocado dentro del cuerpo del envase y posteriormente se grapa la tapa para asegurar un cierre hermético.

Durante el proceso de envasado se pueden generar problemas o errores, debido a los altos estándares de la industria alimenticia. Los lotes o piezas sin las condiciones adecuadas proceden a ser desechados.

Las empresas envasadoras se consideran fuentes directas de generación de residuos, debido a que se puede recopilar grandes volúmenes evitando las cuatro etapas siguientes que se evidencian en la Ilustración 8, llegando directo al transporte y fundición del material. Las latas, posterior a un proceso de vaciado, si fuera el caso, son transportadas directamente a la zona de fundición y recuperación del material aluminio.

3.7.1.2.Consumo

Existen diversos lugares donde se puede dar el consumo de bebidas enlatadas y por lo tanto la generación de residuos de latas de aluminio. Los principales son domicilios, centros comerciales, restaurantes y centros de diversión diurno y nocturno.

Debido a la escasa cultura de clasificación y reciclaje que se vive en Ecuador, un alto porcentaje de los residuos de latas son arrojados a tachos de basura común, donde se mezclan con materia orgánica y otros tipos de materiales inorgánicos reciclables y no reciclables. La ventaja de los

materiales metálicos, y por lo tanto del aluminio, es que no reducen su calidad para ser recuperados al mezclarse con líquidos o materia orgánica, como sucede con el cartón o el papel.

Un bajo porcentaje de los residuos son clasificados desde los puntos de generación y entregados a los recicladores de base y puntos de acopio, donde continuarán con la línea de recuperación del material, desde la compactación del mismo.

3.7.1.3.Recolección y clasificación

Esta es la etapa más complicada del programa logístico para la recuperación del material, debido a los diversos puntos de generación de residuos, la recolección requiere de una gran cantidad de recurso humano, movilización y tiempo.

Por lo general las bolsas de basura son colocadas en canastas fuera de los domicilios o en dispensadores de basura de lugares comerciales, donde existen dos opciones para el destino de las mismas. La una, es la recolección por parte de recicladores de base, quienes seleccionan los materiales con utilidad de recuperación, en este caso las latas de aluminio y las colocan en fundas o costales separados, sin hacer diferencia en el estado del material. La segunda opción de recolección son los camiones municipales, los cuales transportan las bolsas de basura a las estaciones de transferencia de la ciudad de Quito, aquí una parte del material es recolectado por recicladores de base o los denominados “mineros” y la parte no recuperada de aluminio es enviada al relleno sanitario.

El material recolectado para reciclaje es entregado a los centros de acopio, donde se obtiene un valor económico por kilo de aluminio.

3.7.1.3.1. Identificación de puntos de generación de residuos por zona

Se realiza un levantamiento de información, a través de la elaboración de un mapa en el cual se identifica los puntos de generación de residuos de latas que no son domiciliarios, o en los cuales se puede obtener un volumen relevante de material.

3.7.1.3.2. Organización de grupos y comunidades

Para la recolección y clasificación del material se realiza un acercamiento a distintos grupos y comunidades con quienes se promociona la recolección y reciclaje del aluminio como una fuente rentable de ingresos. Se realizan capacitaciones donde se aclara la importancia de su labor como recicladores de base, desde el aspecto ambiental y social, adicionalmente se brinda herramientas que les permita comprender los beneficios económicos que la presente logística les brinda como individuos y como grupo.

Es importante que cada grupo u asociación de personas designe un lugar de almacenamiento, denominado 'centro de acopio'.

En cada uno de los grupos y comunidades se designa un líder de grupo que es quien coordina las recolecciones; rutas y tiempos, que permite una eficiente recolección. Cada grupo según su zona y centro de acopio es comunicado de los distintos puntos de generación de residuos, de esta manera se prioriza la recolección de grandes volúmenes de material y la eficacia del proceso.

3.7.1.4. Compactado

El proceso de compactado se realiza dentro de los centros de acopio, con ayuda de una prensa manual, diseñada para crear cubos de 40x40cm de latas de aluminio, de esta manera se aumenta la densidad del material, facilitando el transporte y disminuyendo costos de logística. Se designa un área en los centros para el almacenamiento temporal del material procesado.

3.7.1.5. Transporte

El transporte de las latas de aluminio procede a partir de la etapa de envasado como antes se menciona o a partir del compactado en los centros de acopio. En ambas opciones se alcanzan grandes volúmenes de material, el cual se coloca en camiones procurando acomodarlos de manera que se optimice el espacio.

Se realiza una recolección semanal del material, los días viernes, donde las asociaciones de recicladores de base reciben la valoración económica por el material recopilado, de parte del representante de la empresa de fundición del material.

Los camiones son tercerizados y se les paga por día. Para optimizar costos se realiza un contacto telefónico previo con los centros de acopio, para confirmar la cantidad de material con el que cuentan y así establecer las rutas de recolección priorizando los centro con mayor cantidad. De la misma manera se establece la cantidad de camiones requeridos para abarcar la totalidad de los centros de acopio y la totalidad de volumen notificado.

3.7.1.6. Separación de Material y Fundición

Al llegar la materia prima a la planta de fundición, está es colocada en una bodega de almacenamiento temporal. Los compactados son uno a uno desarmados, y se realiza una pre selección del material para el ingreso al horno, evitando latas de otros metales o latas con etiquetados plásticos.

El horno es pre calentado, considerando los 36 minutos que tarda en alcanzar la temperatura de fundición del aluminio. Las latas son situadas una a una hasta alcanzar el límite de 2 litros de capacidad del crisol, lo que quiere decir aproximadamente 195 latas, dependiendo de sus pesos y dimensiones. Al obtener el licor de aluminio después de 35 minutos, se eliminan las escorias del

material metálico en un recipiente aparte, con ayuda de un cucharón de hierro, permitiendo la visualización completa del líquido.

3.7.1.7. Vertido y Moldeado

El aluminio en estado líquido es vertido desde el crisol al molde de hierro que tiene forma rectangular. La cantidad de licor colocada alcanza 4cm de altura del molde, creando así un lingote de aluminio de 20cm x 9.5cm x 3.5cm, es decir 665cm³ aproximadamente, con un peso de 1.6kg. Si se desea realizar un lingote con distintas dimensiones se debe considerar las medidas de manera proporcional.

Se esperan 5 minutos durante los cuales procede la solidificación del material a temperatura ambiente. Finalmente se espera hasta el enfriamiento y se golpea el molde lo suficientemente duro para generar la separación del lingote de aluminio del molde de hierro.

3.7.1.8. Venta del material

Los lingotes de aluminio son materia prima para distintas industrias de Ecuador, entre estas la automovilística, construcción y de envasado alimenticio.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se calcula un valor total de construcción del horno de 222.50\$, un costo bajo en relación a los hornos de fundición de metales que se pueden encontrar en el mercado, que si bien, el valor varía según la capacidad de los mismos, estos se mantienen entre los 1500\$ y los 18000\$ (Gracomaq, s/f). El valor de inversión, para la construcción del horno, es accesible para personas que buscan generar ingresos a partir del reciclaje de aluminio, es una opción factible para la obtención de materia prima, que puede ser utilizada para producción de nuevas piezas, en diversas industrias.

Para llegar a la estructura final del horno, se tuvieron que realizar modificaciones, tomando en cuenta las fallas que se presentaban a lo largo de las pruebas de funcionamiento, estas se pueden evidenciar en el anexo fotográfico. De esta manera, se definieron puntos claves a tomar en cuenta para la construcción del mismo; entre estos; la implementación de un soplador, el cual provee de aire adicional e indispensable para evitar el ahogamiento del fuego y por lo tanto obtener la constante quema del combustible. Otro factor importante, es la utilización de un crisol de un material con alto nivel de resistencia, en este caso se sugiere utilizar hierro, por su elevada temperatura de fundición y alta conductividad de calor. Uno de los más importantes, y la razón por la cual durante la Prueba 1 no se alcanzó los niveles de temperatura esperados, es la ubicación del soplete; durante esta prueba se lo ubico en la parte superior, y debido a que el aire caliente es menos denso que el frío, a consecuencia de su dilación y aumento de volumen (Molledo & Tomás, s/f) no se logró retener la suficiente cantidad de calor requerida para la fundición del material. Al colocar el soplete en la parte lateral inferior de la estructura, se logró superar los 660°C para la fundición de aluminio.

Durante las pruebas de funcionamiento se identificaron factores que incrementan la eficiencia del proceso; el colocar las latas aplastadas incrementa la velocidad de combustión de las mismas, adicionalmente se comprobó, lo mencionado por Nagel (2018) que la compactación de las latas, evita la quema del metal y promueve la fundición. Este hallazgo adicionalmente reafirma, la necesidad, de implementar una fase de compactación en el programa de logística de recuperación del material, el cual ya es importante, debido la disminución de espacio de almacenamiento y transporte, y por lo tanto los costos de estos procesos.

Otro factor importante determinado a lo largo de las pruebas, es la relevancia de hacer una pre selección del material que ingresa al horno, a pesar de haber realizado una clasificación de residuos previa, donde se almacenó solo latas de bebidas, se identificaron marcas que utilizan plástico como envoltorio o etiquetado adicional. Esta característica disminuye la tasa de

recuperación de aluminio e incrementa la cantidad de escorias generadas en el proceso, además de generar otro tipo de compuestos en las emisiones, tales como; dioxinas y furanos, altamente contaminantes y tóxicos (SIGNIS, 2019).

La estructura del horno y los materiales de construcción demostraron ser los adecuadas para un eficaz funcionamiento del horno con propósitos de fundición de aluminio y recuperación del material, debido a que se superaron los 660°C requeridos para la fundición y se obtuvo una tasa de recuperación del 68% del metal. Adicionalmente se comprueba a través de los cálculos, que es un equipo que demanda una determinada cantidad de calor para alcanzar su objetivo. En relación al horno construido por Suntaxi, y Torres (2014), el horno en estudio requiere de un 38% menos calor para la fusión del material y en relación al horno elaborado por Saltos y Vargas (2009) el horno requiere de un 3.8% más de generación de calor para alcanzar el mismo objetivo. Las variaciones se pueden generar debido a las diferencias en las dimensiones de las estructuras y los materiales de las mismas características que alteran el nivel de conservación de calor y por lo tanto la necesidad del mismo para la fundición.

Según los datos de emisiones calculadas, por la producción de un lingote de aluminio secundario, de 1.621 kg, en el horno en estudio, se generan 33.33 kilogramos de CO_{2e}. Al comparar este valor con la cantidad de emisiones generadas por la producción de un lingote de aluminio primario, con la misma masa, en Emiratos Árabes Unidos, se aprecia una reducción del 6% en kilogramos de CO_{2e} emitidos (Collins, 2009). Es importante tomar en cuenta que el 49% del tiempo de funcionamiento del horno, y por lo tanto de consumo del combustible, es utilizado para el precalentamiento del horno, lo que quiere decir que, si se aprovechará la temperatura alcanzada en este período para la producción de mayor cantidad de unidades, la huella calculada, por lingote, se disminuiría drásticamente debido a la distribución de estas emisiones por unidad. Otro factor de relevancia al comparar ambos datos es que no se consideran las emisiones generadas por el transporte del aluminio desde Emiratos Árabes

Unidos hasta Ecuador vía marítima y el transporte interno en el país hasta el lugar de fundición, lo cual incrementaría las emisiones del lingote primario.

A partir del cálculo de huella de carbono se determina que la mayor fuente de emisiones en el proceso de reciclaje de aluminio, en el horno, es la quema de GLP, seguido por la producción de este combustible. Sin embargo, se lo considera una opción amable con el ambiente debido a que contamina menos que otras opciones de combustibles; tales como el gasóleo, fueloil o el carbón, adicionalmente es un producto secundario natural que se genera durante la extracción del gas natural y durante el refinado del petróleo (LGP Exceptional Energy, 2015).

Dentro del programa logístico, las etapas de envasado y compactado se consideran las fuentes principales de material, donde se obtiene grandes volúmenes de material. Si se obtiene el aluminio a partir de los residuos de las envasadoras se evitan las posteriores etapas y por lo tanto se minimiza la cantidad de recursos y tiempo para la obtención de materia prima.

Como Castillo (2011) menciona en su programa de reciclaje utilizando la logística inversa, es importante realizar un trabajo con las comunidades, en donde se enfatiza el liderazgo y empoderamiento de estos grupos en la fase de recolección y clasificación del material. Es importante colocar el mayor esfuerzo en estas etapas, debido a que es un proceso que abarca la dura tarea de consolidar billones de unidades de latas usadas y nuevas a lo largo de la ciudad y en general del país (Buffington, 2012). Al trabajar con asociaciones o comunidades en procesos de capacitación y en determinación de puntos clave de obtención de latas, se busca optimizar el tiempo y elevar el volumen de recolección de latas. Al tener distintos grupos con el mismo propósito y diversos puntos de recolección en la ciudad, se maximiza la capacidad del sistema logístico para recuperar material.

Un reto importante de analizar, que afecta el reciclaje de las latas, es la pérdida de las mismas en los botaderos, rellenos sanitarios o procesos de incineración (Tominaga Terukina, 2013).

Evaluando la deficiencia en el sistema de reciclaje del país, donde solo del 15-25% de todo el material recuperable, es reciclado (Alarcon, 2017), se determina que las principales causas de las pérdidas de material, es la falta de cultura de reciclaje en Ecuador y la informalidad en los procesos de recolección de residuos reciclables. Por las razones resaltadas, es importante trabajar en incrementar la educación ambiental en el país desde los años iniciales y de manera transversal en todo el sistema educativo. Adicional y principalmente los gobernantes deben enfocar sus esfuerzos a formalizar el trabajo de los recicladores de base, crear instalaciones adecuadas para el proceso y darles las herramientas y protecciones necesarias, de esta manera dignificando y dándole la importancia que tiene su trabajo. Con lo antes mencionado, se generará ganancia para el municipio, debido a la rentabilidad en la venta de los materiales, y adicionalmente se dará a la población la sensación de eficacia en el proceso, por lo cual, se le dará mayor importancia y percepción de utilidad a la separación de los residuos en los hogares.

Existen algunas mejoras a establecer en el Programa de Recolección para lo cual se requiere de factores externos al alcance del proyecto, debido a que el mismo es elaborado bajo la realidad legal y social actual del DMQ. La base para a implementar mejoras a este plan, es el aporte del gobierno en instaurar normativa que exija a la empresa privada, a cumplir con el principio de responsabilidad extendida de manera adecuada, requiriéndose que por obligación estas organizaciones implementen sistemas de recolección o se encarguen de esta logística económicamente, a través de empresas dedicadas a este servicio, como sucede en países como Alemania y Finlandia, que tiene las tasas más altas de recuperación de este residuo (Mobolaji, 2017). Para que esto suceda, se requiere probablemente de la imposición de valores por incumplimientos y el establecimiento de tasas de recuperación y fechas límites de cumplimiento. De esta manera se facilitará el establecimiento de estrategias, como convenios con la empresa privada para su inversión en el proceso logístico. En el contexto de la responsabilidad de la empresa privada, es importante destacar la influencia de los consumidores,

debido a que la adquisición de productos o en este caso envases ambientalmente amigables de parte de los compradores, se torna en un poder colectivo para generar presión a los productores a mostrar más compromiso con los aspectos ambientales de su negocio (Mobolaji, 2017).

5. CONCLUSIONES

El horno de fundición es una herramienta que permite una eficiente recuperación de material metálico a partir de los residuos del DMQ, reduciendo de esta manera el porcentaje de residuos inorgánicos que llegan al relleno sanitario. El horno permite alargar el tiempo de vida del material, dentro de la cadena productiva, lo cual reduce la necesidad de extracción de minerales del suelo y por lo tanto minimiza los impactos ambientales derivados de esta actividad productiva.

La producción de lingotes de aluminio a partir del reciclaje genera menos emisiones a la atmósfera, en comparación al proceso de obtención primario de este metal, debido a que se requiere de menos consumo de energía y combustible.

El programa logístico permite optimizar tiempo, al enfocar el recurso humano a realizar recolección donde existen grandes volúmenes de material, y de esta manera se maximiza la cantidad de recuperación de metales e incrementa la cantidad de materia prima para la etapa de fundición.

Los costos de construcción del horno son bajos en relación a los hornos industriales que encontramos en el mercado, por lo tanto, se lo puede considerar un equipo de producción asequible para poblaciones con bajos recursos que buscan obtener ingresos a partir de la recolección, clasificación y reciclaje de residuos.

Se debe promover e implementar iniciativas de clasificación, recolección y reciclaje de latas de aluminio en Ecuador, debido a que es una fuente factible de materia prima. La recuperación a partir de la fundición, permitiría disminuir la cantidad de aluminio importado al país y la salida de capital que esto refiere, al considerarse un valor de 0.06 ctvs por importación de lata (Veritrade, 2018) y una producción de 40 000 latas por hora, se calcula un costo de aproximadamente 384 000\$ mensuales, valor que se ahorraría el país invirtiendo en procesos adecuados de recolección y reciclaje de residuos de latas de aluminio. Adicionalmente se generarían fuentes de trabajo para uno de los grupos más vulnerables del país, que son los recicladores de base, quienes en promedio obtienen ingresos de 218\$ al mes e insuficiente apoyo por parte del estado.

6. RECOMENDACIONES

Evaluar la durabilidad del horno de fundición como herramienta de recuperación de material metálico.

Determinar si existe una disminución en la eficiencia del horno, a partir de la comparación de las tasas de recuperación del material con el paso del tiempo y uso del mismo.

Realizar pre tratamiento de las latas, eliminando la pintura del etiquetado de las mismas, y evaluar si se incrementa la tasa de recuperación del material y/o se disminuye la cantidad de escorias generadas en el proceso.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Advameg. (2020). Aluminum Beverage Can. Retrieved from www.madehow.com/Volume-2/Aluminum-Beverage-Can.html%0D
- Alu Stock. (2013). Aluminio (p. 3). Retrieved from <https://www.alu-stock.es/multimedia/descargas/13/Cap10-el-aluminio.pdf>
- Arias, R. (2019). Aplicación y estandarización del método de cálculo volumétrico en tanques estacionarios de plantas de almacenamiento y envasado de GLP (p.52). Retrived from <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20000/1/CD-9355.pdf>
- Ariel, P. G. (2017). Truck de Longbord. Universidad Privada de Argentina. Retrieved from https://fido.palermo.edu/servicios_dyc/blog/docentes/trabajos/39742_149291.pdf
- ARPAL. (2013). *Reciclado de aluminio*. Retrieved from http://www.exyge.eu/blog/wp-content/uploads/2014/02/medioambiente_aluminio.pdf
- Bone, J. A., & Crespo, D. R. (2015). Dieño y construcción de un horno basculante manual para la fundición de materiales no ferrosos de capacidad de hsta 150 Kg. Para el laboratorio de ciencias de materiales de la Escuela Politecnica del Ejercito. Escuela Politecnica del Ejército. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/10418/1/T-ESPE-048865.pdf>
- Buffington, J. (2012). The Beverage Can in the United States: Achieving a 100% Recycled Aluminum Can through Supply Chain Innovation. Estocolmo. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0381-6>
- Calvo, C. S. (2015). Hornos utilizados en la fabricación de aleaciones ferrosas y no ferrosas. *Scientia*, 143–160. Retrieved from [file:///C:/Users/My Pc/Downloads/388-Texto del artículo-786-1-10-20161123.pdf](file:///C:/Users/My%20Pc/Downloads/388-Texto%20del%20articulo-786-1-10-20161123.pdf)
- Castillo, M. J. (2012). Determinación de la Composición y Densidad de los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Metropolitano de Quito con fines de aprovechamiento energético y

- reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. UISEK. Retrieved from https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/1751/1/TRABAJODEFINDECAR_RERA_MJCA.pdf
- Cerdeira, S., Ceretti, H., & Reciulschi, E. (2012). *Educar*. Retrieved from <https://www.educ.ar/recursos/15048/obtencion-del-aluminio/fullscreen/fullscreen>
- Collin, A. (2009). Not All Primary Aluminum Is Created Equal: Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from 1990 to 2005. American Chemical Society. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es800815w>
- Delgado, M., Sanchez, D., & Olaya, J. (2015). Reciclaje de aluminio: oportunidades de desarrollo en Bogotá (Colombia). *Gestión y Ambiente*, 18, 135–152. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169443282008.pdf>
- El Universo. (2015). \$ 9 millones invertidos en una fábrica de latas de cerveza. Retrieved from <https://www.eluniverso.com/noticias/2015/03/23/nota/4682741/9-millones-invertidos-fabrica-latas>
- Emison. (n.d.). *Hornos Industriales*. Barcelona. Retrieved from https://www.emison.es/hornos/pdf/hornos_industriales.pdf
- Gaustad, G., Olivetti, E., & Kirchain, R. (2012). *Resources, Conservation and Recycling*. El Sevier, 58, 79–87. <https://doi.org/https://sci-hub.tw/10.1016/j.resconrec.2011.10.010>
- Geller, T. (2007). *Aluminum: Common Metal, Uncommon Past*. San Francisco. Retrieved from <https://www.sciencehistory.org/distillations/aluminum-common-metal-uncommon-past>
- Gordon, L. (2009). *Aluminum Cans: A Lesson in Product Development*. Machine Design. Retrieved from <https://www.machinedesign.com/materials/metals/article/21832055/aluminum-cans-a-lesson-in-product-development>
- Grau, M., & Muñoz, E. (2013). *Ingeniería Química*. Madrid: Universidad Nacional de

Educación a Distancia.

Hernandez, T. (2016). La era del aluminio y su impacto ambiental: ¿Mito o realidad? Centro de Investigación Científica de Yucatan. Retrieved from [http://congresos.cio.mx/memorias_congreso_mujer/archivos/Resumen Teresa Hernandez Sotomayor.pdf](http://congresos.cio.mx/memorias_congreso_mujer/archivos/Resumen_Teresa_Hernandez_Sotomayor.pdf)

International Aluminium Institute. (2000a). Aluminium Smelting. Retrieved April 23, 2020, from <https://web.archive.org/web/20070519163137/http://www.world-aluminum.org/production/smelting/index.html>

International Aluminium Institute. (2000). Bayer Process Chemistry. Retrieved April 22, 2020, from <https://web.archive.org/web/20070611093908/http://www.world-aluminum.org/production/refining/chemistry.html>

IPPC. (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Retrives December 10, 2020 from <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>

Líderes. (2019). Ellos enlatan cervezas, energizantes, sodas... Retrieved from <https://www.revistalideres.ec/lideres/latable-emprendimiento-enlatado-bebidas-domicilio.html>

Lucendo, J. (2019). 80 siglos de invenciones: Diccionario de los inventos.

LPG Exceptional Energy. (2015) GLP. <https://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2015/10/WLPGA-EE-PDF-ES.V1.pdf>

Mamani, C. (2018). Obtención de lumina a partir de la hidralgiritita (Chacko) por el proceso Bayer. Universidad Nacional de Altiplano. Retrieved from http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/8973/Mamani_Mamani_Constantin.pdf?sequence=1&isAllowed=y

McCann, M. (2012). Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. In Metalurgia y Metalisteria (Instituto).

Miner. (s/f). Directiva 96/61 relativa a la prevención y control integrados de la contaminación.

<http://www.prtr->

[es.es/Data/images/Gu%C3%ADa%20Tecnol%C3%B3gica%20Metalurgia%20del%20Aluminio-4CFD1924B67CB2AE.pdf](http://www.prtr-es.es/Data/images/Gu%C3%ADa%20Tecnol%C3%B3gica%20Metalurgia%20del%20Aluminio-4CFD1924B67CB2AE.pdf)

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea Forja y Fundición. Bilbao. Retrieved from <http://www.prtr-es.es/Data/images/FORJA-Y-FUNDICION-FFDD42E5D746EEB9.pdf>

Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (2016). Fabricación de aluminio (emisiones de proceso). Retrieved from https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040301-fabric-aluminio_tcm30-502319.pdf

Mobolaji, D. (2017) The Reverse Logistics of Beverage Containers (A Case Study of Lagos, Nigeria). Aalto University School of Business. <https://core.ac.uk/download/pdf/80723608.pdf>

Nabertherm. (n.d.). Hornos e Instalaciones de Tratamiento Térmico. Lilienthal. Retrieved from https://www.nabertherm.es/produkte/giesserei/foundry_spanish.pdf

Nigrinis, R. (2006). Chevrolet Vivant 2006. Carros y Clasicos. <https://www.carrosyclasicos.com/pruebas/item/755-chevrolet-vivant-2006#:~:text=El%20consumo%20de%20los%20casi,1.500%20y%20las%202.500%20rpm.>

Palacios, G., Pantoja, H., & Pantoja, A. (1985). Cálculo, diseño y construcción de horno de acero eléctrico para fundir aceros con capacidad de 30 kilos. Universidad Autonoma de Occidente. Retrieved from <https://red.uao.edu.co/bitstream/10614/4678/1/T0002505.pdf>

Saltos, J. F., & Vargas, J. J. (2009). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE CRISOL BASCULANTE, CALENTADO POR COMBUSTIBLE PARA LA

FUNDICIÓN DE ALUMINIO. Universidad Politécnica del Ejército Sede Latacunga.
Retrieved from <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/3448/1/T-ESPEL-0594.pdf>

Suntaxi, E., & Torres, C. (2014). Diseño y construcción de un horno crisol para la fundición de aluminio con una capacidad de 15Kg/h a una temperatura de 800°utilizando GLP. Universidad Politecnica Salesiana. Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7226/6/UPS-KT00851.pdf>

SIGNIS. (2019). Preocupante contaminación causada por quema de basura plástica. <http://signisalc.org/noticias/ecologia/09-05-2019/preocupante-contaminacin-causada-por-quema-de-basura-plstica>

The Aluminium Association. (2020). History of Aluminium. Retrieved April 21, 2020, from <https://www.aluminum.org/aluminum-advantage/history-aluminum>

Thomas Jefferson National Accelerator Facility - Office of Science Education. (2020). Aluminium. Retrieved from <https://education.jlab.org/itselemental/ele013.html>

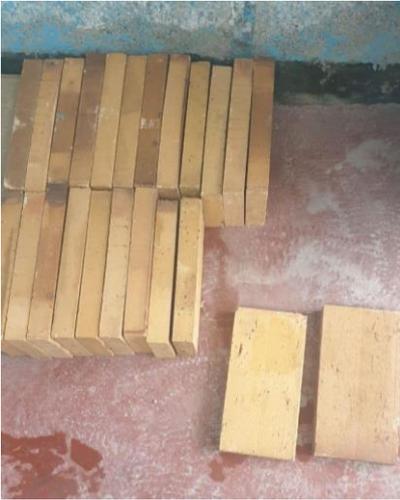
Tominaga Terukina, A. (2013). Barriers and solutions for closed-loop aluminium beverage can recycling. Norwegian University of Science and Technology. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/52101177.pdf>

Vega, L. (2012). Ecuador y sus Oficinas Comerciales – Dubai: Perspectivas y Oportunidades de Negocio. Universidad del Azuay. <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/3794/1/09362.pdf>

ANEXOS

7.1.Materiales

Ladrillos refractarios



Base Metálica



Crisol de Hierro



Molde de Hierro



Tanque de gas 15kg y manguera

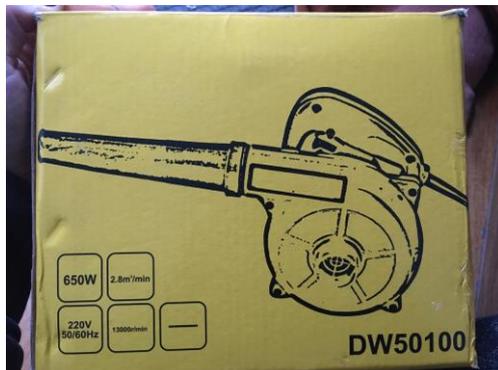


Latas



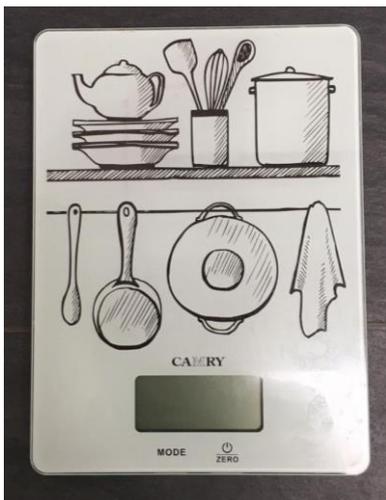
7.2.Equipos

Soplador



7.3.Equipos de medición

Balanza



Multímetro



Termocupla



Termómetro infrarrojo



7.4. Proceso de construcción de horno

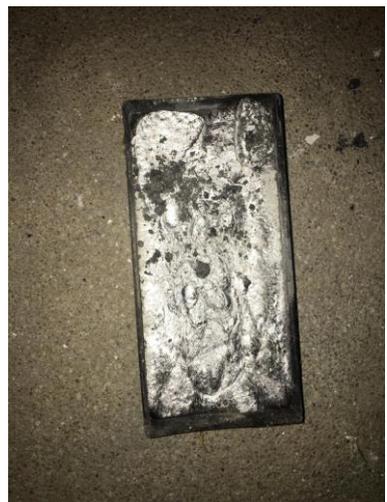


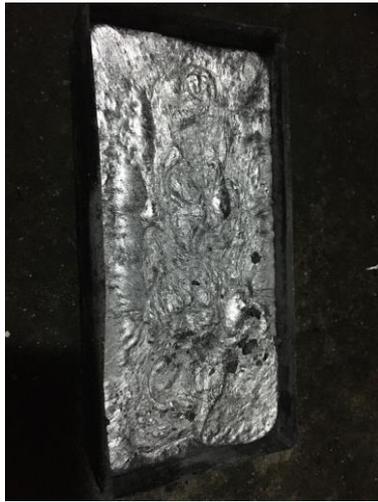
7.5.Pruebas de funcionamiento

7.5.1. Prueba 1



7.5.2. Prueba 2





7.5.3. Prueba 3



7.6. Cálculos de consumo energético

7.6.1. Energía necesaria para el proceso de fundición

Q1: Energía requerida para elevar la temperatura del aluminio, a partir de la temperatura ambiente hasta la temperatura de fundición.

Q2: Energía requerida para transformar el aluminio de sólido a líquido (calor latente de fusión del metal)

Q3: Energía necesaria para sobrecalentar el aluminio hasta obtener temperatura de vertido

Q es la cantidad de calor requerido para fundir el metal y es igual a la suma de los tres calores detallados anteriormente.

$$Q_{\text{carga metálica}} = Q1 + Q2 + Q3$$

El valor es evaluado con la ecuación:

$$Q = \frac{m * Cp (Tf - To)}{t}$$

Q=Calor (kcal/h)

m=peso del metal (kg)

Cp=Calor específico (kcal/kg °C)

Tf=Temperatura final=Punto de fusión aluminio (°C)

To=Temperatura inicial=Temperatura ambiente (°C)

T=Tiempo (h)

*Se toma el valor de masa promedio de materia prima utilizado en las pruebas (

Tabla 7)

7.6.2. Calor requerido para elevar T de 20°C a 660°C (Q1)

$$m = 2.37 \text{ kg}$$

$$C_p \text{ aluminio} = 0.23 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \text{ (Tabla 1)}$$

$$T_f = 660^\circ\text{C}$$

$$T_o = 20^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = \frac{2.37 \text{ kg} * 0.23 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (660 - 20)^\circ\text{C}}{1 \text{ h}}$$

$$Q_1 = 348.86 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

7.6.3. Calor requiero para el cambio de fase (Q2)

$$Q_2 = \frac{m\gamma}{t}$$

$$m = 2.37 \text{ kg}$$

$$\gamma = 94 \text{ kcal/kg}$$

$$t = 1 \text{ h}$$

$$Q_2 = \frac{2.37 \text{ kg} * 94 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}}{1 \text{ h}}$$

$$Q_2 = 222.78 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

7.6.4. Calor requerido para alcanzar T de fusión (Q3)

$$m = 2.37 \text{ kg}$$

$$C_p = 0.23 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C}$$

$$T_f = 692.5^\circ\text{C}$$

$$T_o = 660^\circ\text{C}$$

$$T = 1 \text{ h}$$

- La temperatura final es el promedio de las temperaturas finales de la prueba 1 y 2 (Tabla 4)

$$Q_3 = \frac{2.37kg * 0.23 \frac{kcal}{kg^{\circ}C} (692.5 - 660)^{\circ}C}{1h}$$

$$Q_3 = 17.72 \frac{kcal}{h}$$

El calor total requerido transferido al metal (carga metálica) será la sumatoria de los tres calores individuales.

$$Q_{carga\ metálica} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{carga\ metálica} = (348.86 + 222.78 + 17.72) \frac{kcal}{h}$$

$$Q_{carga\ metálica} = 589.36 \frac{kcal}{h}$$

7.6.5. Calor absorbido por el crisol (Qac)

El crisol metálico absorbe calor para elevar su temperatura ambiente hasta la de fusión del aluminio la cual se determina con la siguiente ecuación:

$$Q_{ac} = \frac{m * Cp (Tf - To)}{t}$$

m= Peso del crisol = 0.79 kg

Cp= 0.107 kcal/kg°C

Tf= 692.5°C

To= 20°C

T=1h

$$Q_{ac} = \frac{0.79kg * 0.107 \frac{kcal}{kg^{\circ}C} (692.5 - 20)^{\circ}C}{1h}$$

$$Q_{ac} = 56.84 \frac{kcal}{h}$$

7.6.6. Calor total requerido para la fusión (Qk)

Se determina a partir de la sumatoria del gasto parcial de las energías involucradas en el proceso

$$Qk = Q_{carga\ metalica} + Q_{ac}$$

$$Qk = 589.36 \frac{kcal}{h} + 56.84 \frac{kcal}{h}$$

$$Qk = 646.21 \frac{kcal}{h}$$

$$Qk = 751.54 W$$

7.6.7. Perdidas de Calor

Aplicando la ecuación de transferencia de calor por conducción de paredes cilíndricas

a) Desde a cámara al crisol

$$Qk = \frac{2\pi KL (T1 - T2)}{\ln \frac{r_o}{r_1}}$$

Qk= Calor requerido para fundir el aluminio

K= Coeficiente de conductividad térmica del crisol = 73 W/m°C (hierro)

L= Longitud crisol

T1= Temperatura pared exterior del crisol

T2= Temperatura de pared interior del crisol

r_o= radio desde centro de la cámara hacia la pared externa del crisol

r₁= radio tomado desde centro de la cámara hacia pared interna de crisol

$$T1 = \frac{Qk * \ln \frac{r_o}{r_1}}{2\pi KL} + T2$$

$$T_1 = \frac{751.54 \text{ W} * \ln \frac{0.0815 \text{ m}}{0.0775 \text{ m}}}{2\pi * 73 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} * 0.13 \text{ m}} + 692.5^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 693.13^\circ\text{C}$$

b) Desde a cámara a las paredes

$$RTk_2 = \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi KL}$$

RTk2= Resistencia a transferencia de calor por conducción del material refractario

r2= Radio desde centro de la cámara hacia borde interno estructura

r3= Radio desde centro de la cámara hacia borde externo estructura

K= Coeficiente de conductividad térmica material refractario = 0.5 W/ m K

Lp= Longitud pared refractaria

$$RTk_2 = \frac{\ln \frac{0.179 \text{ m}}{0.115 \text{ m}}}{2\pi * 0.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} * 0.47 \text{ m}}$$

$$RTk_2 = 0.30 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

La base metálica también participa en resistencia térmica la cual se calcula de la siguiente manera:

$$RTk_3 = \frac{\ln \frac{0.180 \text{ m}}{0.179 \text{ m}}}{2\pi * 54 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} * 0.47 \text{ m}}$$

K= Coeficiente de conductividad térmica material metálico = 54 W/m °C (Acero)

r4= r3 + espesor metal (0.001m)

$$RTk3 = 0.000035 \frac{^{\circ}C}{W}$$

Adicionalmente existe la resistencia de transferencia de calor por el aire (RTc) que se encuentra en la cámara de combustión

$$RT_c = \frac{1}{h_{\infty} 2\pi r_4 L}$$

Coefficiente de transferencia de calor por convección natural de gases. Los valores pueden variar de 2-25, se selecciona un valor de 12.

$$h_{\infty} = 12 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$RT_c = \frac{1}{12 \frac{W}{m^2\text{C}} * 2\pi * 0.180m * 0.47m}$$

$$RT_c = 0.16 \frac{^{\circ}C}{W}$$

Flujo de calor perdido por las paredes

$$Q_p = \frac{\Delta T}{\sum R}$$

$$Q_p = \frac{(T1 - Tamb)}{\sum(RTk2 + RTk3 + RTc)}$$

$$Q_p = \frac{(693.13^{\circ}C - 20^{\circ}C)}{\sum(0.30 \frac{^{\circ}C}{W} + 0.000035 \frac{^{\circ}C}{W} + 0.16 \frac{^{\circ}C}{W})}$$

$$Q_p = 1463.21W * 0.8598 \frac{kcal}{h} \frac{h}{W}$$

$$Q_p = 1258.07 \frac{kcal}{h}$$

7.6.8. Cantidad de energía total utilizado

$$Q_T = (Q_k + Q_p)$$

$$Q_T = (751.54 W + 1463.21 W)$$

$$Q_T = 2214.75 W * 0.8598 \frac{\frac{kcal}{h}}{W}$$

$$Q_T = 1904.24 \frac{kcal}{h}$$

7.6.9. Combustible requerido por una hora de funcionamiento

$$Q_T = mC_p\Delta T$$

C_p= Calor específico del gas

T_f= 692.5°C + 273 = 965.5 K

T_o= 20°C + 273 = 293 K

Base de tiempo promedio de funcionamiento: 1.21 horas

Para calcular el calor específico del GLP, se considera que en Ecuador está conformado por 75% propano y 25% butano (Rojas, 2015).

C_p Butano = 1.694 KJ/ kg K o 0.407 kcal/ kg K

C_p Propano = 1.669 KJ/kg K o 0.401 kcal/ kg K

$$C_p \text{ promedio} = \left(0.25 * 0.407 \frac{\text{kcal}}{\text{kg K}}\right) + \left(0.75 * 0.401 \frac{\text{kcal}}{\text{kg K}}\right)$$

$$C_p \text{ promedio} = 0.403 \frac{\text{kcal}}{\text{kg K}}$$

$$m_g = \frac{1904.24 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{0.403 \frac{\text{kcal}}{\text{kgK}} * (965.5 - 293)\text{K}} = 7.03 \frac{\text{kgGLP}}{\text{h}}$$

$$m_g = 7.03 \frac{\text{kgGLP}}{\text{h}} * 1.21 \text{ h} = 8.50 \text{ kgGLP}$$

7.7. Cálculo de emisiones

7.7.1. Emisiones por quema de GLP

Densidad de GLP:

Densidad Butano = 584.1 kg/m³

Densidad Propano = 507.6 kg/m³ (INEN, 2013)

$$\text{Densidad promedio} = \left(0.25 * 584.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) + \left(0.75 * 507.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$$

$$\text{Densidad promedio} = 526.73 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Densidad promedio} = 1.99 \frac{\text{kg}}{\text{gal}}$$

$$\text{Volumen de GLP} = \frac{8.50 \text{ kgGLP}}{1.99 \frac{\text{kgGLP}}{\text{gal}}} = 4.27 \text{ gal}$$

Según el IPCC se aplica la siguiente fórmula para el cálculo de emisiones por consumo de combustibles:

$$\text{Emisiones CO}_2\text{e} = \text{Cantidad de combustible} * \text{Poder Calorífico} * (\text{Emisiones CO}_2 + \text{Emisiones CH}_4 * \text{PCG CH}_4 + \text{Emisiones N}_2\text{O} * \text{PCG N}_2\text{O})$$

(IPCC,2006)

Emisiones por quema de GLP

$$= 4.27 \text{ gal} * 0.0001046 \frac{\text{TJ}}{\text{gal}} * (63100 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{TJ}} + 1 \frac{\text{kgCH}_4}{\text{TJ}} * 30 + 0.1 \frac{\text{kgN}_2\text{O}}{\text{TJ}} * 265)$$

$$\text{Emisiones por quema de GLP} = 28.21 \text{ kgCO}_{2e}$$

7.7.2. Emisiones por consumo energético

$$\text{Potencia de consumo} = \frac{650 \text{ W}}{73 \text{ min}} = 8.90 \frac{\text{W}}{\text{min}} * 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} = 534.25 \frac{\text{W}}{\text{h}}$$

$$\text{Potencia de consumo} = 534.25 \frac{\text{W}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ kW}}{1000\text{W}} = 0.53 \frac{\text{kW}}{\text{h}}$$

Factor de emisión Ecuador 2019: 0.1136 kgCO_{2e}/kWh

Para calcular las emisiones por consumo energético se utiliza la formula general de cálculo de emisiones del IPCC (2006):

$$\text{Dato de actividad} * \text{Factor de emision} = \text{Emisiones (CO}_{2e}\text{)}$$

$$0.53kWh * 0.1136 \frac{kgCO_{2e}}{kWh} = 0.06 kgCO_{2e}$$

7.7.3. Emisiones por combustión de gasolina (transporte)

Rendimiento Chevrolet Vivant: 38km/16gal de gasolina (Nigrinis,2006)

Rendimiento Chevrolet Vivant: 2.38 km/gal gasolina

$$\frac{2.38 \frac{km}{gal}}{10.8 km} = 0.22 gal gasolina$$

Emisiones por transporte de latas

$$= 0.22gal * 0.000126 \frac{TJ}{gal} * (69300 \frac{kgCO_2}{TJ} + 33 \frac{kgCH_4}{TJ} * 30 + 3.2 \frac{kgN_2O}{TJ} * 265)$$

$$**Emisiones transporte de latas = 1.972 kgCO_{2e}**$$

7.7.4. Emisiones por producción de GLP

Factor de emisión de producción de GLP (pozo a tanque): 0.19102 kgCO_{2e}/l GLP (DEFRA,2018)

Uso de combustible del horno es de 4.27 galones, es decir 16.16 litros.

$$**Emisiones por producción = 16.16 l GLP * 0.19102 \frac{kgCO_{2e}}{l GLP}**$$

$$**Emisiones por producción = 3.09 kgCO_{2e}**$$