

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS QUÍMICAS Y AMBIENTALES

PROYECTO DE GRADUACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

“MAGÍSTER EN CIENCIAS AMBIENTALES”

TEMA

**“ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA VARILLA DE ACERO SAE 1029
PRODUCIDA EN GUAYAQUIL”**

AUTOR

BERENICE ANDREA PONTÓN TOMASELLI

Guayaquil - Ecuador

AÑO

2017

DEDICATORIA

A mis padres.

A mi esposo.

A mis hermanos.

AGRADECIMIENTO

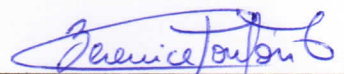
Mi más profundo agradecimiento para quienes hicieron posible que este proyecto pueda concretarse, así como a la distinguida entidad que me abrió las puertas para el desarrollo este estudio.

Un agradecimiento especial a mi Director, por su invaluable apoyo y conocimientos impartidos para la consecución del presente proyecto.

A mi familia y a mi esposo, que siempre estuvieron pendientes de la evolución de este proyecto. Por todas sus muestras de apoyo y de ánimo, que fueron fundamentales.

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Graduación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo, corresponde exclusivamente a la **Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Departamento de Matemáticas** de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.



Berenice Andrea Pontón Tomaselli

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



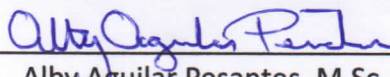
Paola Almeida Guerra, Ph.D.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Ángel Ramírez Mosquera, Ph.D.

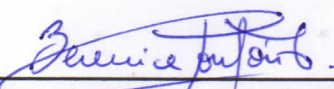
DIRECTOR DEL PROYECTO



Alby Aguilar Pesantes, M.Sc.

VOCAL PRINCIPAL

FIRMA DE LOS AUTORES DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN



Ing. Berenice Andrea Pontón Tomaselli.

RESUMEN

El presente estudio muestra los resultados del análisis de ciclo de vida (ACV) de la varilla de acero SAE 1029 para construcción, producida en la ciudad de Guayaquil, para determinar los impactos ambientales de las etapas del proceso. La metodología empleada para la evaluación fue realizada conforme lo establece la norma ISO 14040 e ISO 14044, que se enfoca en cuatro fases: Definición del objetivo y alcance, Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV), Evaluación del Impacto Ambiental del Ciclo de Vida (EICV) e Interpretación de Resultados.

Se definió la unidad funcional como 1 tonelada de varilla de acero SAE 1029 producida en una planta de acería de la ciudad de Guayaquil. La unidad funcional se estableció como un valor numérico para determinar los datos de entrada y salida del proceso y sus interrelaciones. Se determinó como límite del sistema un esquema de tipo la cuna a la puerta (cradle-to-gate), que incluye actividades de captación y procesamiento de materia prima (chatarra ferrosa reciclada), proceso de acería y laminación en caliente hasta la obtención del producto estudiado (varilla de acero).

Para el análisis de inventario del ciclo de vida se compilaron y cuantificaron las entradas y salidas del proceso de fabricación de varilla de acero SAE 1029 de acuerdo a los límites del sistema establecidos, cuyos datos recolectados correspondieron al año 2015. Para la evaluación de impactos se utilizó el método CML2002, que permitió cuantificar los indicadores de impacto asociados a las categorías agotamiento biótico, cambio climático, acidificación, eutrofización, formación de oxidantes fotoquímicos y agotamiento de ozono troposférico.

Los resultados obtenidos determinaron que el proceso de obtención de palanquilla SAE 1029 a partir de chatarra clasificada, que se realiza en el área de acería, es el que presentó las mayores contribuciones en todas las categorías de impacto analizadas, siendo el consumo de energía eléctrica del horno de arco eléctrico el que provoca el impacto más alto.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
DECLARACIÓN EXPRESA	III
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN.....	IV
FIRMA DE LOS AUTORES DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN	V
RESUMEN	VI
TABLA DE CONTENIDO	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	X
CONTENIDO DE SIGLAS	XI
CONTENIDO DE ABREVIATURAS.....	XII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. JUSTIFICACIÓN	2
1.2. HIPÓTESIS	3
1.3. OBJETIVO	3
2. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA VARILLA DE ACERO SAE 1029.....	4
2.1. FASES DE UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)	5
2.2. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO	6
2.2.1. DEFINICIÓN DE LA UNIDAD FUNCIONAL.....	7
2.2.2. SISTEMA Y LÍMITES DEL SISTEMA	7
2.2.3. SELECCIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO	8
2.3. ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA (ICV)	9
2.4. EVALUACIÓN DE IMPACTO DEL CICLO DE VIDA (EICV).....	9
2.4.1. SELECCIÓN DE CATEGORÍAS DE IMPACTO, INDICADORES DE CATEGORÍA Y MODELOS DE CARACTERIZACIÓN.	10
2.5. INTERPRETACIÓN DEL CICLO DE VIDA.....	11
2.6. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE PRODUCTOS DE ACERO A PARTIR DE CHATARRA FERROSA.	11
3. OBJETIVO Y ALCANCE DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA VARILLA DE ACERO SAE- 1029	16
3.1. OBJETIVO	16
3.2. ALCANCE	16
3.2.1. UNIDAD FUNCIONAL	17
3.2.1.1. CARACTERÍSTICA DE LA VARILLA DE ACERO SAE-1029	18
3.2.2. DESCRIPCIÓN Y LÍMITES DE LOS SISTEMAS.....	19
3.2.3. REQUERIMIENTO DE CALIDAD DE DATOS.....	21
3.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA VARILLA DE ACERO SAE 1029. ...	23
3.3.1. PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE CHATARRA	23
3.3.2. PROCESO DE ACERÍA	25
3.3.2.1. HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.....	28
3.3.3. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE GASES Y MATERIAL PARTICULADO	30
3.3.3.1. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA INDUSTRIAL UTILIZADA EN ACERÍA.....	31
3.4. LAMINACIÓN EN CALIENTE	32
3.4.1. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA INDUSTRIAL UTILIZADA EN LAMINACIÓN EN CALIENTE	35
3.5. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA VARILLA DE ACERO 1029 PARA CONSTRUCCIÓN.....	35
4. ANÁLISIS DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (AICV).....	36

4.1.	DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DE INVENTARIO	36
4.2.	FUENTES DE DATOS UTILIZADAS.....	40
5.	EVALUACIÓN DE IMPACTO DEL CICLO DE VIDA (EICV) DE LA VARILLA DE ACERO SAE 1029	43
5.1.	METODOLOGÍA E INDICADORES SELECCIONADOS.....	43
5.2.	RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA VARILLA DE ACERO SAE-1029.....	47
5.2.1.	RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS FASES DE PREPARACIÓN DE CHATARRA CLASIFICADA, PALANQUILLA SAE 1029 Y VARILLA SAE 1029	47
5.2.2.	ANÁLISIS DE CONTRIBUCIÓN POR FASES.....	54
5.2.2.1.	RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA FASE DE PREPARACIÓN DE CHATARRA CLASIFICADA.	54
5.2.2.2.	RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA FASE DE PALANQUILLA SAE 1029.	56
5.2.2.3.	RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN LA FASE DE OBTENCIÓN DE VARILLA DE ACERO SAE 1029.	58
5.2.3.	ANÁLISIS DE CONTRIBUCIÓN POR INDICADOR DE IMPACTO.....	60
5.2.3.1.	AGOTAMIENTO ABIÓTICO	60
5.2.3.2.	AGOTAMIENTO ABIÓTICO POR COMBUSTIBLES FÓSILES	61
5.2.3.3.	CALENTAMIENTO GLOBAL.....	62
5.2.3.4.	AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO.....	64
5.2.3.5.	OXIDACIÓN FOTOQUÍMICA	65
5.2.3.6.	ACIDIFICACIÓN	66
5.2.3.7.	EUTROFIZACIÓN	67
5.3.	COMPARACIÓN CON RESULTADOS DE OTROS ESTUDIOS.....	69
6.	CONCLUSIONES	71
	BIBLIOGRAFÍA.....	74
	ANEXOS.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Etapas de un Análisis de Ciclo de Vida</i>	6
<i>Figura 2. Elementos de la Fase de EICV</i>	10
<i>Figura 3. Nomenclatura del acero al carbono.</i>	19
<i>Figura 4. Límites del Sistema del ACV de la varilla de acero SAE 1029.</i>	20
<i>Figura 5. Sistema de calentamiento Consteel y Horno de Arco Eléctrico.</i>	25
<i>Figura 6. Esquema de la Máquina de Colada Continua</i>	28
<i>Figura 7. Horno de arco eléctrico para fundición de acero (vista interior)</i>	29
<i>Figura 8. Horno de arco eléctrico y cuchara refractaria</i>	29
<i>Figura 9. Tren de Laminación en Caliente</i>	33
<i>Figura 10. Esquema del flujo de proceso de la varilla de acero.</i>	34
<i>Figura 11. Contribución por fase de la Caracterización de Impacto de la Fabricación de Varilla de Acero SAE 1029</i>	49
<i>Figura 12. Resultados de Caracterización de la Fase de Chatarra Clasificada.</i>	55
<i>Figura 13. Resultados de Caracterización de la Fase de Obtención de Palanquilla SAE 1029</i>	58
<i>Figura 14. Resultados de Caracterización de la Fase de Obtención de Varilla SAE 1029</i>	60
<i>Figura 15. Contribución Agotamiento Abiótico</i>	61
<i>Figura 16. Contribución Agotamiento Abiótico por Combustibles Fósiles</i>	62
<i>Figura 17. Contribución Calentamiento Global</i>	63
<i>Figura 18. Contribución Agotamiento de la Capa de Ozono</i>	65
<i>Figura 19. Contribución Oxidación Fotoquímica</i>	66
<i>Figura 20. Contribución Acidificación</i>	67
<i>Figura 21. Contribución Eutrofización</i>	68

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Alcance del ACV de la varilla de acero SAE-1029 producida en Guayaquil</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 2. Especificaciones mecánicas de la varilla de acero SAE-1029</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 3. Datos de Inventario de la Fase de Chatarra Clasificada</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 4. Datos de Inventario de la Fase de Obtención de Palanquilla SAE 1029 (Acería)</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 5. Datos de Inventario de la Fase de Obtención de Varilla SAE 1029 (Laminación en Caliente)</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 6. Fuentes de Datos para la Fase de Chatarra Clasificada</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 7. Fuentes de Datos para la Fase de Obtención de Palanquilla SAE 1029</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 8. Fuentes de Datos para la Fase de Obtención de Varilla SAE 1029</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 9. Factores de caracterización y unidades de indicador de impacto del método CML 2000.</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 10. Resultados de Caracterización de Impacto de las Fases de Chatarra Clasificada, Palanquilla SAE 1029 y Varilla SAE 1029</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 11. Resultados de Caracterización de la Fase de Preparación de Chatarra en base a 1 tonelada de chatarra reciclada</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 12. Resultados de Caracterización de la Fase de Obtención de Palanquilla SAE 1029 en base a 1 tonelada de palanquilla</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 13. Resultados de Caracterización de la Fase de Obtención de Varilla SAE 1029 en base a 1 tonelada de varilla</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 14. Consumo de energía eléctrica de la Fase de Obtención de Palanquilla SAE 1029</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 15. Comparación de resultados para 1 tonelada de acero producido mediante tecnología de horno de arco eléctrico</i>	<i>69</i>

CONTENIDO DE SIGLAS

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
BOF	Basic Oxygen Steelmaking (Horno Básico de Oxígeno)
CML	Centre of Environmental Science at Leiden University
ECOINVENT	Centro Suizo de Inventarios de Ciclo de Vida
EAF	Electric Arc Furnace
EICV	Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GWP	Global Warming Potencial
HAE	Horno de arco eléctrico
ICV	Inventario de Ciclo de Vida
IEA	International Energy Agency (Agencia Internacional de Energía)
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
ISO	International Standard Organization
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SPOLD	Society for Promotion of Life-cycle Assessment Development
WSA	World Steel Association / Asociación Mundial del Acero.

CONTENIDO DE ABREVIATURAS

°C	Grados centígrados
cm	Centímetro
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
gal	Galones
GJ	Giga joule
KWh	Kilovatio hora
Kg	Kilogramo
lt	Litro
m	Metro
MJ	Mega joule
mm	Milímetro
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
NO_x	Óxidos de nitrógeno
SO_x	Óxidos de azufre
SO₂	Dióxido de azufre
Ton	Tonelada
tkm	Tonelada por kilómetro

CAPÍTULO I.

1. INTRODUCCIÓN

El acero es una aleación o combinación de hierro y carbono, que se utiliza en una amplia gama de aplicaciones (usos) y productos del mercado global, por la versatilidad de sus propiedades mecánicas; y su utilización es fundamental para que el hombre pueda avanzar hacia un futuro sostenible.

Dentro de las propiedades [1] que tiene el acero se encuentran:

- Ductilidad.- Capacidad que tiene el acero para deformarse, al soportar esfuerzos de tracción sin llegar a la rotura.
- Dureza.- Es la propiedad del acero a oponerse a la penetración de otro material.
- Resistencia.- Es la fuerza máxima por unidad de área que el acero puede soportar al ser estirado (resistencia a la tracción).
- Maleabilidad.- Capacidad del acero para soportar la deformación, al ser sometido a un esfuerzo de compresión, sin llegar a romperse.

La **World Steel Association (WSA)** es una organización que representa a más de 170 productores de acero en el mundo, a asociaciones industriales nacionales y regionales, y a institutos de investigación del acero, cuyos miembros representan alrededor del 85% de la producción mundial [2]. Dicha asociación publica anualmente las estadísticas de la industria siderúrgica a nivel mundial, por diferentes rutas de producción, sean estas: hornos abiertos, altos hornos y hornos de arco eléctrico; y estableció para el año 2014 una producción mundial de acero de 1,67 billones de toneladas (datos compilados y que fueron proporcionados por 94 países), contribuyendo el Ecuador con 667.000 toneladas métricas.

En el año 2015, la WSA reportó una producción mundial de acero de 1,60 billones de toneladas (datos de 66 país que corresponden al 99% de la producción del año), aportando nuestro país con 720.000 toneladas. Para el año 2016 (datos considerados hasta el mes de junio), se logró una producción mundial de 794,85 millones de toneladas, de las cuales 293.000 toneladas fueron producidas por Ecuador [3].

Toda la producción de acero para diversos usos conlleva una serie de procesos que implican posibles impactos al medio ambiente y a la salud pública, cuyos efectos a largo plazo motivan a desarrollar métodos que permitan analizar y establecer medidas para mitigar los impactos ambientales [4, pp. 1-21].

El dióxido de carbono (CO₂) es el gas de efecto invernadero de mayor relevancia para la industria mundial del acero, que en promedio se emiten 1,8 toneladas de CO₂ por cada tonelada de acero producido. De acuerdo con la International Energy Agency (IEA), esta industria representa aproximadamente el 6,7% del total de las emisiones mundiales de CO₂ [5].

Las estadísticas de producción reportadas por la World Steel Association, indican que el mayor consumo de acero se da en la construcción, representando el 50% de la producción total; quedando el 50% restante distribuido de la siguiente manera: el 16% se destina a la fabricación de equipos, 13% al sector automotriz, 11% a productos de acero, otros sectores como medios de transporte (5%), equipos eléctricos (3%) y electrodomésticos 2% [6].

1.1. Justificación

Análisis de Ciclo de Vida (ACV) o *Life Cycle Assessment* (LCA) por sus siglas en inglés, es la herramienta de evaluación ambiental cualitativa más utilizada para cuantificar y evaluar los posibles impactos ambientales asociados al ciclo de vida de un producto [7], tales como agotamiento biótico, cambio climático, agotamiento de ozono troposférico, acidificación, eutrofización y formación de oxidantes fotoquímicos [8].

En Ecuador existen empresas dedicadas a la fabricación de acero para diversos usos, especialmente para el sector de la construcción, que utilizan en sus procesos hornos de combustión. No se conoce los impactos ambientales que produce esta industria específica en el país; por lo que es necesario determinar el desempeño ambiental aplicando como herramienta metodológica el ACV para productos de acero [6].

El presente estudio servirá para determinar qué proceso del ciclo de vida de la varilla de acero SAE 1029 es el mayor contribuyente a las categorías de impacto analizadas.

1.2. Hipótesis

El presente trabajo obedece a la siguiente hipótesis:

“El proceso de fundición es el mayor contribuyente al impacto ambiental de la fabricación de la varilla de acero SAE 1029”.

1.3. Objetivo

- Determinar qué proceso del ciclo de vida de la producción de la varilla de acero SAE 1029 es el mayor contribuyente al impacto ambiental.

El presente proyecto de investigación contribuirá con información relevante para las empresas dedicadas a la fabricación de varillas de acero, que les permita conocer: ¿Cuál es la etapa del ciclo de vida de la varilla de acero SAE 1029 que tiene mayor aporte al impacto ambiental?.

La pregunta planteada busca la relación entre las variables: 1) Ciclo de vida de la varilla de acero SAE 1029 y 2) El impacto ambiental de la misma de acuerdo a los límites del sistema planteados.

Para cumplir con el propósito de esta investigación, se utilizará como herramienta el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que permitirá analizar los impactos ambientales de la varilla de acero SAE 1029.

CAPÍTULO II.

2. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA VARILLA DE ACERO SAE 1029

Una de las técnicas de gestión ambiental desarrolladas para cuantificar los posibles impactos asociados con los productos y servicios es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), considerada una herramienta metodológica que permite medir el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida (desde la obtención de materias primas hasta su fin de vida).

El ACV se fundamenta en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema, con la finalidad de obtener resultados que evidencien los potenciales impactos ambientales, para determinar estrategias de reducción o minimización de los mismos [9].

Para Wendell [10] y Van Hoof et al. [11], el Análisis de Ciclo de Vida permite establecer un marco analítico para identificar los posibles impactos potenciales al ambiente característicos de procesos industriales a lo largo de su ciclo de vida, producidos por emisiones a la atmósfera, descargas de aguas residuales industriales, generación de desechos y consumo energético; para poder establecer estrategias para su reducción y lograr que una empresa opere de manera amigable con el medio ambiente.

La calidad, importancia e interpretación de los resultados de un ACV, así como su aplicación, dependen específicamente de la metodología utilizada. Existen normas de la Organización Internacional de Normalización (ISO) que proporcionan una guía sobre las opciones metodológicas, estándares internacionales y presentación de informes para el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), siendo estas las normas ISO 14040 [12] e ISO 14044 [13]:

- ISO 14040: 2006 - Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Principios y marco de referencia.
- ISO 14044: 2006 - Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Requisitos y directrices.

De acuerdo a la Norma ISO 14040:2006, El Análisis de Ciclo de Vida aborda los aspectos e impactos ambientales potenciales (por ejemplo, el uso de recursos y las consecuencias ambientales de sus liberaciones) a lo largo del ciclo de vida de un producto hasta el fin de su vida útil, desde la adquisición de materias primas, producción, uso y eliminación (tratamiento, reciclaje y disposición final), es decir de la cuna a la tumba (cradle to grave).

Existen organizaciones y asociaciones internacionales tales como la SPOLD (Society for Promotion of Life-cycle Assessment Development), conformada por grandes empresas europeas, organizaciones científicas de investigación y consultoras; así como la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), cuyo propósito se fundamenta en el estudio de la toxicología ambiental, y define al Análisis de Ciclo de Vida como un *“proceso objetivo para evaluar cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando el uso de materia, energía y vertidos al entorno; para determinar su impacto en el medio ambiente y evaluar y poner en práctica estrategias de mejora medioambiental”* [14].

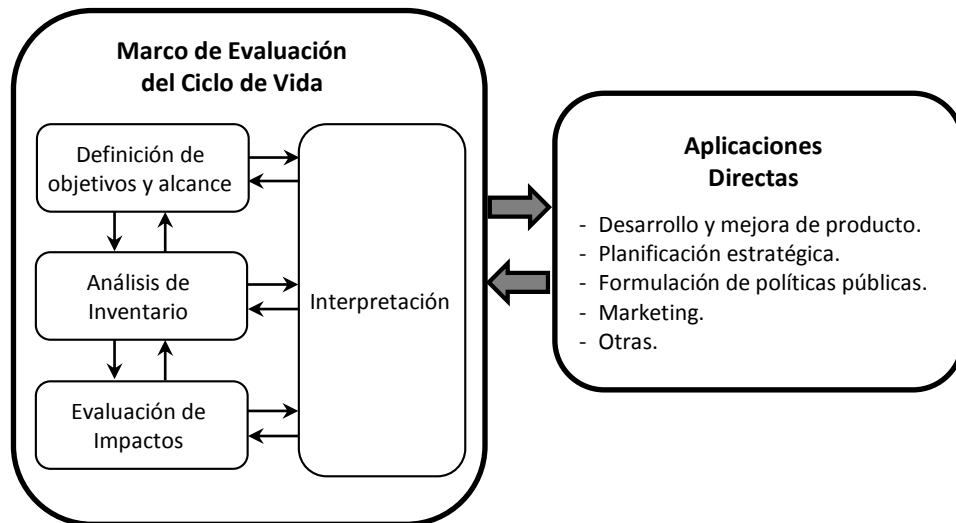
2.1. Fases de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

La Norma ISO 14040:2016 [12, p. 7-8], establece cuatro fases de un Análisis de Ciclo de Vida:

- Definición del objetivo y alcance.- En esta fase se establecen el propósito del estudio, los límites del sistema, los datos necesarios para las siguientes fases.
- Análisis de inventario.- Se cuantifican las entradas (materias primas, insumos, energía), flujos (proceso detallado de acuerdo a los límites del sistema) y salidas del sistema (emisiones, desechos, descargas, etc.).

- Evaluación del Impacto.- Consiste en clasificar y evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida, relacionando los resultados con efectos ambientales observables mediante un conjunto de categorías de impactos tales como acidificación, reducción de la capa de ozono, toxicidad, agotamiento de los recursos, entre otros.
- Interpretación de Resultados.- Los resultados obtenidos de las fases anteriores son evaluados en conjunto con los objetivos definidos en el estudio, lo que permitirá determinar las conclusiones y recomendaciones finales del estudio mediante modelos de clasificación y caracterización.

La figura 1 muestra las fases principales de un estudio de Análisis de Ciclo de Vida ACV [12 p. 8].



Fuente y Autor: ISO 14040:2006

Figura 1. Etapas de un Análisis de Ciclo de Vida

2.2. Definición de Objetivos y Alcance del Estudio

El objetivo de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) comprende la aplicación prevista y las razones para llevar a cabo el estudio, el público al que va dirigido; es decir, a quiénes se prevé comunicar los resultados del estudio, y si los resultados están

destinados a ser utilizados en afirmaciones comparativas destinadas a ser divulgadas al público [12, p. 11].

El alcance deberá ser claramente definido para asegurar que la amplitud, la profundidad y nivel de detalle del estudio sean compatibles y suficientes para lograr el objetivo planteado. Incluye: el sistema del producto a estudiar, las funciones del sistema del producto, la definición de la unidad funcional, los límites del sistema, los requisitos de calidad de los datos necesarios, las características de impacto seleccionadas y la metodología de evaluación de impactos [12, p. 11].

2.2.1. Definición de la Unidad Funcional

El propósito de definir la unidad funcional es proporcionar una referencia a partir del cual todas las entradas y salidas del sistema estén relacionadas, para garantizar la comparabilidad de los resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV); es decir que todos los datos deben estar normalizados. La unidad funcional debe ser cuantitativa [15].

2.2.2. Sistema y Límites del Sistema

El límite del sistema define los procesos unitarios que deben incluirse en el sistema para que pueda ser modelado de tal manera que las entradas y salidas en su frontera sean flujos elementales [12, p. 12]. Al establecer el límite del sistema, se deben tener en cuenta varias etapas del ciclo de vida, procesos unitarios y flujos, tales como:

- Adquisición de materias primas;
- Entradas y salidas del proceso de manufactura;
- Distribución / transporte;
- Producción y uso de combustibles, electricidad y calor;
- Uso y mantenimiento de productos;
- Eliminación de desechos del proceso;
- Recuperación de productos usados (incluida la reuso, reciclado y recuperación de energía);

- Delimitación de la zona geográfica y el horizonte temporal considerado.
- Fabricación de materiales auxiliares;
- Producción y producción de bienes capital;
- Operaciones adicionales, como iluminación y calefacción.

2.2.3. Selección de las categorías de impacto

Se entiende como categoría de impacto cualquier afectación al ambiente generada por flujos energéticos y materiales del Inventario del Ciclo de Vida (ICV). Por lo general los resultados del ICV contemplan emisiones y parámetros de extracción de recursos, los mismos que para poder realizar la evaluación posterior, deben ser asignados a las categorías de impacto. Es decir, el CO₂ (monóxido de carbono) y el CH₄ (metano) se asignan a la categoría calentamiento global; en tanto que el SO₂ (dióxido de azufre) y NH₃ (amoníaco) a la categoría de impacto de acidificación; pero se pueden asignar varias categorías de impacto a la vez como el SO₂ que puede ser asignado las categorías salud humana y enfermedades respiratorias [16]. Se recomienda usar la categoría de impactos ambientales del Manual de Evaluación de Ciclo de Vida holandés (CML 2002), que es una guía más detallada que las ISO e incluye datos para la evaluación de impactos [7, p. 23].

El tiempo de análisis se define como el periodo por medio del cual un producto a lo largo de su ciclo de vida es manufacturado, utilizado, desechado, y genera impactos ambientales. La definición de límite de tiempo corresponde no solo al periodo de colección de datos y análisis, sino además al tiempo potencial relacionado con sus efectos [17].

2.3. Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

La norma ISO 14040:2006 define el Análisis de Inventario del Ciclo de Vida como la fase de análisis de ciclo de vida que comprende la compilación y cuantificación de entradas y salidas para un producto a lo largo de su ciclo de vida [12, p. 2].

La recolección de datos para cada proceso unitario dentro de los límites del sistema corresponden a: 1) entradas de energía, materia prima, entradas auxiliares, otros medios físicos; 2) productos, co-productos¹ y desechos; 3) emisiones al aire, descargas al agua y suelo; entre otros. Una vez colectados los datos, el procedimiento de cálculo incluye: validación de los datos colectados, relación de los datos con los procesos unitarios y la relación de los datos con el flujo de referencia de la unidad funcional; que son necesarios para generar los resultados del inventario del sistema definido para cada proceso unitario y para la unidad funcional definida para el sistema de producto a ser modelado [12, p. 13].

2.4. Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV)

La Evaluación del Impacto Ambiental del Ciclo de Vida (EICV) es definida por la norma ISO 14040:2006 como la fase de evaluación del ciclo de vida destinada a comprender y evaluar la magnitud e importancia de los impactos ambientales potenciales para un sistema de producto durante todo su ciclo de vida, utilizando los resultados del Inventario de Ciclo de Vida (ICV) [12, p. 2].

La elección, el modelo de categorización y la evaluación de las categorías de impacto ambiental pueden llevar a la subjetividad en la fase de EICV; por lo tanto la transparencia es crítica para la evaluación del impacto, ya que hay que asegurar que las asunciones sean claramente puntualizadas y reportadas. Los elementos de la fase de EICV son: 1) Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de categorización; 2) Asignación de resultados del Inventario de Ciclo de

¹ *Dos o más productos procedentes de la misma unidad de proceso o sistema de producto [16, p. 3].*

Vida y 3) Resultados de cada indicador de categoría [12]; y se ilustran en la figura a continuación; a excepción de los elementos opcionales de la fase de EICV que no fueron contemplados:

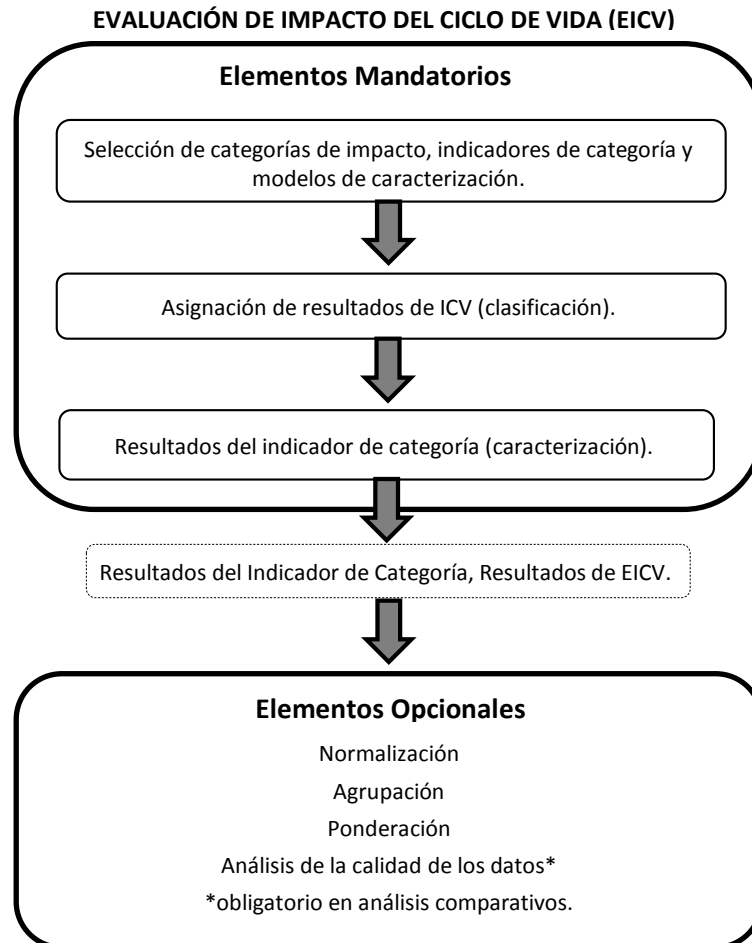


Figura 2. Elementos de la Fase de EICV

Fuente y Autor: ISO 14040:2006

El nivel de detalle, así como la elección de los impactos evaluados y metodologías utilizadas, dependen del objetivo y alcance del estudio.

2.4.1. Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización.

La selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización deben ser justificados y consistentes con el objetivo y alcance de un ACV [13].

El conjunto de categorías de impacto se elige en sub-fases, que puede ser una especificación de los impactos ambientales relevantes contemplados en la definición del objetivo y alcance, basada la información que fue recolectada durante el análisis de inventario [12].

Las sub-fases principales son: [7, pp. 129-169].

- **Definición de las categorías de impacto:** Consiste en identificar y seleccionar las categorías de impacto, modelos de cadenas causa-efecto y sus puntos finales (endpoints).
- **Clasificación:** Comprende la asignación de parámetros de resultado de EICV, a sus respectivas categorías de impacto.
- **Caracterización:** Cálculo del alcance del impacto ambiental por categoría de impacto, utilizando factores de equivalencia que constituyen mecanismos físico-químicos de las diferentes sustancias y su contribución en las diferentes categorías de impacto.

2.5. Interpretación del Ciclo de Vida

La Interpretación del Ciclo de Vida es la fase en la que se combinan los resultados del análisis de inventario y la evaluación de impacto. Producto de la interpretación de resultados se pueden respaldar las conclusiones y recomendaciones para facilitar la toma de decisiones; así como comprobar la fase del ciclo de vida del producto que genera las principales cargas ambientales y qué etapas o fases del sistema evaluado de acuerdo al objetivo y alcance del estudio, pueden o mejorarse [18].

2.6. Revisión bibliográfica de aplicación de Análisis de Ciclo de Vida de productos de acero a partir de chatarra ferrosa.

De acuerdo a la World Steel Association (WSA), en su publicación de políticas e indicadores del año 2015, se obtuvieron 1,665 mega toneladas de acero producido para diversos usos, de las cuales el 50% se destinaron al sector de la construcción. La intensidad energética promedio para la producción de acero es de 20GJ / t [6]. En los

últimos 50 años la industria siderúrgica ha reducido en un 60% el consumo de energía por tonelada de acero producida y en promedio se emiten 1,9 toneladas de CO₂ por cada tonelada de acero producido [6].

La worldsteel (WSA) llevó a cabo un estudio de Inventario de Ciclo de Vida, para cuantificar el uso de recursos, energía y emisiones asociadas a la fabricación de 15 productos de la industria siderúrgica en los que incluye la varilla de acero, desde la extracción primaria de materiales hasta la puerta de la fábrica (cradle to gate). Los datos de inventario se tomaron de 49 sitios operados por 15 compañías de Europa, Asia y América del Norte, en las que se incluyeron 24 operaciones de alto horno y 12 operaciones de hornos de arco eléctrico. Las empresas que aportaron datos al estudio representaron más del 25% de la producción mundial de acero bruto [19].

Se definió la unidad funcional como producción de 1 kg de producto de acero en la puerta de la fábrica. Los datos se calcularon para productos derivados de la ruta de alto horno (a base de mineral de hierro y chatarra de acero) y Horno de arco eléctrico (a base de chatarra de acero), para desarrollar una metodología mundial común de productos de acero a partir del estudio original y actualizado al 2010, producir datos de inventario a nivel mundial (de la cuna a la puerta e incluyendo el reciclaje al final de su vida útil), siendo las categorías analizadas: demanda primaria de energía, potencial de calentamiento global, acidificación, eutrofización y potencial de creación de oxidantes fotoquímicos. Para la evaluación se utilizó el software GaBi 4 LCA, desarrollado por PE International GmbH [19].

Para la categoría “demanda primaria de energía”, para cada uno de los tres productos de acero segregados, más del 97% de la demanda provenía de recursos no renovables, la mayoría atribuibles al consumo de carbón. Para “calentamiento global”, dominaron las emisiones de CO₂ y metano, representando más del 98% de todas las emisiones de gas de efecto invernadero (GEI) de la industria siderúrgica. En

“potencial de acidificación” predominaron emisiones a la atmósfera, aportando más del 97% a este impacto el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno [19].

En “potencial de eutrofización” predominaron emisiones a la atmósfera (por óxidos de nitrógeno) con un el 94%. Las descargas al agua que contribuyeron a este impacto son de sustancias que contienen nitrógeno (ej.: nitrato, amoníaco). El “ozono fotoquímico” estuvo dominado por el monóxido de carbono, que representó más del 60% de la contribución a este impacto [19].

Un estudio de cálculo de la huella hídrica de la industria siderúrgica, lo realizaron Yifan Gu et al., utilizando datos de una planta del este de China. Analizó las características de la industria siderúrgica desde la perspectiva de EICV, y propone el uso de huella hídrica en lugar de indicadores convencionales, desarrollando un modelo de cálculo de huella de agua que incluye huellas de agua directas y virtuales, considerando un análisis de límites del sistema para desarrollar una metodología común y factible de evaluación de la huella hídrica industrial. El estudio evaluó el riesgo del agua basado en resultados de cálculos de huella hídrica, considerando una huella de consumo de agua (agua azul) de $2,24 \times 10^7 \text{ m}^3$ para la fábrica seleccionada, incluyendo el agua virtual, y una huella teórica (agua gris) de $6,5 \times 10^8 \text{ m}^3$ para el año 2011, presentando riesgo al ambiente acuático. El estudio concluyó que la huella del agua debería ser promovida como un indicador para la industria siderúrgica, ya que puede reflejar los riesgos reales en el agua, y mejorar la eficiencia en el uso y consumo del recurso [20].

Un estudio de ACV de la producción de acero en Polonia, realizado por Dorota B.-Korol [21], a través de la producción de acero mediante las rutas de hornos de arco eléctrico, definió las principales fuentes de impactos ambientales y propuso métodos de prevención de la contaminación para procesos de fabricación de acero más contaminantes, cuya metodología se basó en la ISO 14044 y para la evaluación del inventario utilizaron el software SimaPro 7.3.3 con la base de datos de Ecoinvent,

siendo la unidad funcional “1 tonelada de acero fundido”, cuyos resultados indicaron que la producción de arrabio en altos hornos tiene el mayor impacto en emisiones de gases de efecto invernadero, y el consumo de combustibles fósiles en la ruta integrada de producción de acero, mientras que el proceso de sinterización del mineral de hierro, que es el mayor contribuyente a las emisiones de polvo y gases, utiliza muchos minerales y agota el metal. El consumo de electricidad tuvo el mayor impacto en emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de combustibles fósiles en el horno de arco eléctrico [21].

El artículo muestra los resultados del ACV de consumo de combustible alternativo en una planta nacional de sinterización de mineral de hierro y concluyó que los métodos de prevención de la contaminación relacionados con sustituciones de materias primas en procesos de fabricación de hierro, deberían utilizarse para reducir impactos ambientales de la industria siderúrgica [21]. Además realizó comparaciones de los resultados con los estudios de Das and Kandpal [22], Hu et al. [23] y Sakamoto et al. [24].

Un estudio de análisis de ciclo de vida de la industria del hierro y acero en Turquía, realizado por Gulnur O. et al., utilizó el software SimaPro e IMPACT 2002 como método para evaluación de impactos, para comparar los impactos de los procesos fabricación de carbón, sinterización, hierro, acero con productos finales (palanquilla, alambrón laminado en caliente, bobina laminada en caliente, losa), teniendo como límite del sistema la cuna a la puerta y unidad funcional “1 tonelada de producto final de acero”. El proceso de fabricación de acero presentó el más alto impacto ambiental, seguido por la sinterización. Mayores impactos se dieron en categorías de salud y cambio climático. La producción de carbón mostró alto impacto en agotamiento de recursos de energía no renovable, y presentó una contribución negativa en la categoría cambio climático debido al consumo de energía externo evitado, ya que se consideró una producción de carbono por medio de hornos de carbón a gas [25].

La comparación de los impactos para los diferentes productos reveló que la bobina de acero laminada en caliente provoca el impacto más alto seguido por el alambrón, palanquilla y plancha rectangular denominada losa. Se compararon tres diferentes escenarios representando tres diferentes productos: semi terminados (palanquilla y losa) y terminados (alambrón y bobina), y se encontró que impactos mayores provenían si todos los productos fueran los terminados, y el laminado en caliente de productos de fundición cubre aproximadamente el 24% del total de los impactos ambientales de todo el ciclo de producción de 1 tonelada de producto [25].

Un estudio de ACV de la industria del acero en la industria del reciclaje de buques en Bangladesh, realizado por Rahman, S.et al., para productos reciclados de acero como barras de refuerzo para la construcción, menciona que pueden representar una drástica reducción en el consumo de energía y huella ecológica, en comparación con la producción de mineral de hierro virgen. Se utiliza un método de EICV para evaluar el uso y emisiones de energía desde que los buques se transportan desde el país de origen, para desmontar los buques retirados hasta los recicladores finales. La varilla de acero producida a partir de chatarra reciclada ahorra 16,5 GJ de energía primaria por tonelada de corrugado, y 1965 kg de emisiones de GEI (CO₂) por tonelada de varilla corrugada, en comparación con las barras de refuerzo primarias [26].

El estudio comparó las diferentes operaciones unitarias de procesamiento de chatarra de acero para evaluar sus impactos ambientales de GEI, el uso de recursos en términos de energía primaria MJ, salud humana y calidad del ecosistema; y determinó que las actividades que ocurren fuera de los astilleros son las responsables del mayor daño. Los impactos adversos en el corte de buques varados son generados por el uso de oxígeno líquido y el uso de antorchas de gas. Los cambios en los métodos de corte o el uso de equipo de protección durante el corte reducirían en gran medida impactos ambientales y salud local [26].

CAPÍTULO III.

3. OBJETIVO Y ALCANCE DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA VARILLA DE ACERO SAE-1029

3.1. Objetivo

- Cuantificar los impactos ambientales de la varilla de acero SAE- 1029, producida en la ciudad de Guayaquil, generados a lo largo del proceso de fabricación, desde la obtención de la materia prima hasta su procesamiento y obtención del producto final (varilla de acero SAE-1029).
- Identificar la actividad del proceso que contribuye principalmente a las categorías de impacto analizadas durante el ciclo de vida de la varilla de acero SAE-1029.
- Analizar las entradas (insumos, materias primas, combustibles, etc.) y salidas (emisiones, desechos, etc.) de las etapas de: 1) Captación y Procesamiento de Chatarra, 2) Acería (fundición), 3) Laminación en Caliente hasta la obtención de la varilla SAE-1029, que aportan en mayor medida a cada una de categorías de impacto consideradas.
- Determinar las actividades de las etapas del proceso anteriormente descritas, que tienen mayor influencia en las categorías de impacto estudiadas.
- Comparar la afectación ambiental para las diferentes etapas del proceso de fabricación de la varilla de acero SAE-1029.

3.2. Alcance

El alcance del Análisis de Ciclo de Vida de la varilla de acero SAE-1029, siguiendo las indicaciones de la norma ISO 14040:2006 [12] y NTC-ISO 14044:2007 [13], se presentan en la siguiente tabla esquemática:

Tabla 1. Alcance del ACV de la varilla de acero SAE-1029 producida en Guayaquil

Sistema a estudiar:	Proceso de fabricación de varilla de acero SAE 1029 para construcción.
Funciones de procesos a comparar:	Impactos ambientales de las diferentes fases del proceso a partir de las rutas de fabricación: 1) Captación y Procesamiento de Chatarra. 2) Proceso de fundición (Acería). 3) Laminación en Caliente.
Unidad funcional:	1 Tonelada de varilla de acero SAE-1029.
Nombre comercial de la varilla:	Varilla/barra corrugada soldable; o Varilla/barra termo-tratada.
Límites del sistema:	De la cuna a la puerta (cradle-to-gate).
Categorías de impacto seleccionadas:	Agotamiento Abiótico, Cambio Climático, Potencial de Acidificación (PA), Potencial de Eutrofización (PE), Potencial de Formación de Oxidantes Fotoquímicos (PFOF) y Agotamiento de Ozono Troposférico.
Metodología de evaluación de impactos:	CML2002.
Requisitos de los datos:	Que sean datos primarios de información, en la medida de lo posible. Que sean de bases de datos de ACV o de otras fuentes secundarias. Fuentes secundarias de información.

Fuente y Elaboración: Autor.

3.2.1. Unidad Funcional

Para el presente proyecto de graduación, la unidad funcional corresponde a:

1 Tonelada de varilla de acero SAE 1029, producida en una planta de acería de la ciudad de Guayaquil.

La varilla de acero se la conoce comercialmente como Varilla/barra corrugada soldable; o Varilla/barra termo-tratada y tiene las siguientes características [27].

- Diámetro: 12 mm.
- Longitud: 12 metros.

- Peso: 10,656 kg.

Las especificaciones mecánicas de la varilla se presentan en la tabla a continuación [27]:

Tabla 2. Especificaciones mecánicas de la varilla de acero SAE-1029

Límite de fluencia, mínimo, MPa (kgf/cm ²)	420 (4 200)
Límite de fluencia, mínimo, MPa (kgf/cm ²)	540 (5 400)
Resistencia a la tracción, mínima, MPa (kgf/cm ²)	550 (5 500)
Alargamiento (%) mínimo con probeta	Lo = 200 mm
Diámetro nominal (mm)	%
8 – 20	14
22 – 36	12
40	10
NOTA: La resistencia a la tracción real debe ser igual o mayor a 1,25 veces el límite de fluencia real registrado en el ensayo de la probeta.	

Fuente: Norma NTE-INEN 2167. Varillas de Acero con resaltes, laminadas e caliente, soldables, microaleadas o termotrataadas, para hormigón armado. Requisitos.

Elaboración: Autor.

3.2.1.1. Característica de la Varilla de Acero SAE-1029

La nomenclatura de la varilla de acero SAE-1029 corresponde a:

- 1 Aleación principal : Manganeso
- 0 No hay modificador
- 2 y 9 indican el porcentaje de carbono, en este caso 0,29%.

La figura a continuación muestra la nomenclatura del acero ordinario al carbono con 0,29% de carbono.

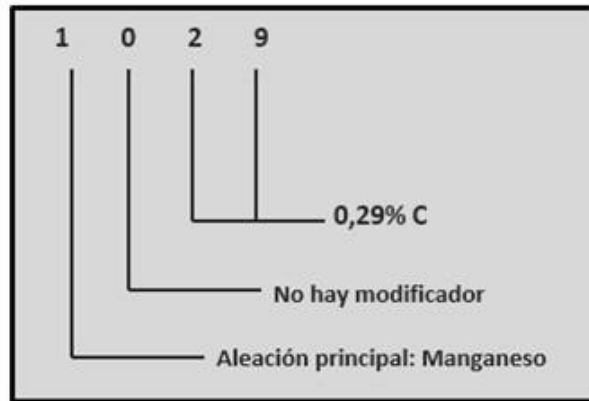


Figura 3. Nomenclatura del acero al carbono.

Fuente: Norma NTE.INEN.0102.2011 Varillas corrugadas de
acero al carbono laminadas en caliente [28].

Elaboración: Autor.

3.2.2. Descripción y Límites de los Sistemas

Se ha definido como límites del sistema “*De la cuna a la puerta (cradle-to-gate)*”, y precisan las unidades de proceso que se incorporan en la Evaluación del Ciclo de Vida.

Las unidades de proceso están compuestas por los flujos de materia y energía (insumos, materiales y componentes) que corresponden a las entradas; y, desechos, emisiones, etc., que forman parte de las salidas del proceso hasta la obtención del producto final.

Los límites del sistema comprenden las actividades y operaciones correspondientes a las siguientes etapas del proceso de fabricación de la varilla de acero SAE 1029:

- 1) Fase de obtención de Chatarra Clasificada.
- 2) Fase de obtención de Palanquilla SAE 1029.
- 3) Fase de fabricación de Varilla SAE 1029.

En la Fig. 4 se muestra los límites del sistema del presente proyecto.

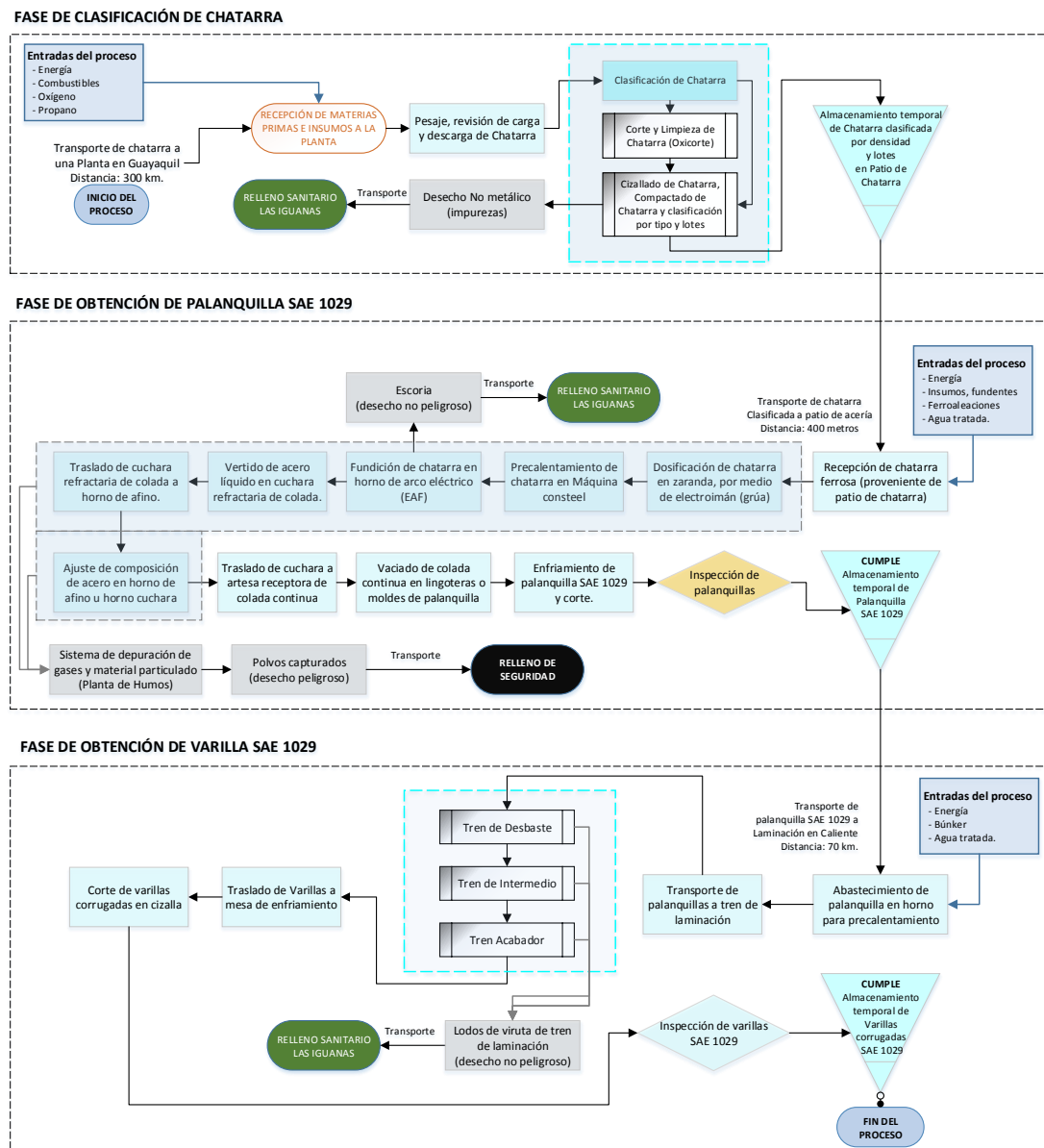


Figura 4. Límites del Sistema del ACV de la varilla de acero SAE 1029.

Fuente y Elaboración: Levantamiento *in situ* en una Planta de Guayaquil / Autor.

➤ Fase de Clasificación de Chatarra

En esta fase se realiza el análisis de los materiales, energía, combustibles e insumos (oxígeno y gas propano) utilizados para el procesamiento y clasificación de chatarra reciclada; que implica el transporte de la chatarra recogida en un centro de acopio ubicado a 300 kilómetros de Guayaquil, pesaje en una Planta ubicada en Guayaquil, preparación, limpieza, corte y clasificación de la chatarra que será requerida para en

la siguiente fase (proceso de acería). El producto obtenido en esta etapa es “Chatarra ferrosa clasificada tipos A, B y C”.

➤ **Fase de Obtención de Palanquilla SAE 1029 (fundición)**

Esta fase abarca desde el transporte de chatarra clasificada desde el patio de chatarra, hasta la nave de acería para el proceso de fundición en un horno de arco eléctrico, el uso de insumos, fundentes y ferroaleaciones para el ajuste de la colada requerida para la fabricación de la palanquilla SAE 1029 en la máquina de colada continua, y los desechos que se generan en el proceso (escoria, laminilla).

Esta fase contempla además el uso de agua tratada, necesaria para el enfriamiento de las paredes del horno de arco eléctrico y afino; así como la utilización de este recurso en la máquina de colada continua para la solidificación y obtención de palanquilla. Se considera el empleo de energía eléctrica durante todo el proceso, así como el sistema de depuración de gases y material particulado cuyo desecho son los polvos capturados que son transportados a un relleno de seguridad para su adecuada disposición.

➤ **Fase de Obtención de Varilla SAE 1029 (laminación)**

Esta fase contempla el transporte de la palanquilla SAE 1029 desde la nave de acería hasta el área de laminación en caliente; el consumo de bunker para el horno de precalentamiento de palanquillas, la energía empleada en el tren de laminación constituido por el tren desbaste, tren intermedio y acabador, así como los procesos subsiguientes hasta la obtención de la varilla de acero SAE 1029; el uso de agua tratada y los desechos generados en esta fase (lodos de laminilla).

3.2.3. Requerimiento de calidad de datos

Con el propósito de tener información fundamental para la consecución de los objetivos del estudio, se realizó el levantamiento de información en una planta de acería ubicada en la ciudad de Guayaquil; y los datos obtenidos atañen a fuentes

primarias de información; es decir proporcionadas por la Planta y corresponden a datos del año 2015.

La información levantada por cada fase se detalla a continuación:

➤ **Fase de Clasificación de Chatarra**

- Cantidades procesadas de chatarra por tipo.
- Consumo de diésel de los equipos que manipulan la chatarra dentro del patio.
- Consumo de energía de la prensa.
- Consumo de insumos como oxígeno, gas propano.
- Cantidades de desechos generados en el proceso.
- Características de los vehículos que arriban con chatarra a la planta.

➤ **Fase de Obtención de Palanquilla SAE 1029**

- Cantidades de chatarra clasificada por tipo, para procesamiento en acería.
- Cantidades de insumos, fundentes y ferroaleaciones utilizados para fundición y ajuste de la colada.
- Consumo de energía del proceso de acería.
- Consumo de agua tratada para enfriamiento de paredes refractarias de hornos y para proceso de colada continua.
- Cantidad de escoria generada en la fundición.
- Producción de palanquillas SAE 1029.
- Cantidades de laminillas generadas durante el proceso.
- Consumo de aceites y grasas.
- Total de polvos capturados en sistema de extracción de gases y material particulado.

➤ **Fase de Obtención de Varilla SAE 1029**

- Consumo de combustible de vehículos (montacargas) que transportan palanquilla de acero SAE-1029 a proceso de Laminación en Caliente.

- Cantidades de palanquilla SAE 1029 que se procesan en laminación en caliente.
- Consumo de bunker en horno de precalentamiento de palanquilla para procesamiento de varillas de acero SAE-1029.
- Consumo de aceites y grasas utilizados en laminación para fabricación de varillas SAE 1029.
- Cantidades de laminilla (desecho no peligroso) que se generan en laminación.
- Consumo de energía del proceso de laminación en caliente.
- Cantidades de varilla SAE 1029 que se obtienen en laminación.

3.3. Descripción del Proceso de Fabricación de la Varilla de Acero SAE 1029.

El proceso de fabricación de la varilla de acero SAE-1029 producida en la ciudad de Guayaquil, cumple una serie de pasos hasta obtener el producto final; cuya materia prima fundamental para la producción de acero es la chatarra ferrosa; que de acuerdo a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2505, se define como *“cualquier material ferroso de distinta procedencia, destinado al reciclaje, para ser utilizado como materia prima”* [29]. A continuación se describe el proceso de fabricación de la varilla de acero SAE-1029, identificando cada fase.

3.3.1. Proceso de Clasificación de Chatarra

La chatarra que se procesa es adquirida a nivel nacional y proviene del sector industrial, de la generación de la población (coches, cocinas, etc.), y de reservas históricas (ferrocarriles, cementeras, empresas públicas). La mayor parte proviene de la región costa (70%), y el 30% restante de la sierra. **Fuente: levantamiento de información propia (autor).**

El proceso inicia con el arribo de chatarra ferrosa reciclada a las instalaciones de una planta de acería ubicada en la ciudad de Guayaquil, la misma que llega en camiones de diferentes tonelajes. Se realiza el pesaje de los vehículos en una báscula

electrónica, que tiene incorporado un sistema de detección de chatarra radiactiva² [29]. Una vez pesada e inspeccionada la carga, se clasifica por densidad y lotes. Este proceso se realiza en una máquina clasificadora, que la clasifica de la siguiente manera:

- Chatarra Clase A (material pesado): es la chatarra ferrosa de mayor densidad. En esta categoría se ubican material ferroso naval, restos de maquinaria industrial, agrícola, equipo caminero, material automotriz, vigas, planchas, material cortado.
La densidad mínima de esta chatarra es 800 kg/m³ [29].
- Chatarra Clase B (material semi-pesado – para oxicorte): Chatarra ferrosa de chasis, vehículos, partes de maquinarias, equipos, estructuras.
La densidad mínima de esta chatarra es 500 kg/m³ [29].
- Chatarra Clase C (material liviano para compactación o prensa cizalla): material ferroso de desechos de troqueladoras, latas finas, virutas, hojalatas, etc.

El proceso de clasificación de chatarra, se realiza de dos maneras:

- 1) Manual.- Efectuado por personas que ejecutan actividades de corte (utilizando oxígeno “oxicorte”) y limpieza de la chatarra.
- 2) Mecánica.- Utilizando una prensa que realiza actividades de cizallado, limpieza y trituración (compactado), y a su vez mediante un grupo de imanes, separa la chatarra en ferrosa y no ferrosa.

De estas operaciones se generan desechos de chatarra no ferrosa, constituidos principalmente por plomo, cobre, aluminio, zinc, estaño, bronce y elementos indeseables que suelen presentarse frecuentemente en la chatarra.

² ***“Es la chatarra que contiene material radiactivo o que ha sido contaminada por contacto con material radiactivo”.***

Toda la chatarra ferrosa que se utiliza en el proceso de acería debe encontrarse libre de elementos indeseables o chatarra radiactiva, y tener un diámetro de 40 cm para que el horno de fundición pueda ser cargado. La chatarra ferrosa clasificada por lotes, limpia, procesada y compactada³, es transportada y descargada en la nave de acería mediante vehículos constituidos por cabezales, que utilizan diésel como combustible.

3.3.2. Proceso de Acería

Una grúa conformada por un electroimán atrae la chatarra ferrosa de diferentes tipos (A, B, C y chatarra importada), que se encuentra almacenada al inicio de la nave de acería, para luego colocarla en un sistema consteel que se caracteriza por el uso de quemadores en el túnel de precalentamiento de la chatarra clasificada e inyectores poscombustión en el horno.

Está conformado por una zaranda transportadora cuyo mecanismo es generar un movimiento oscilatorio, que a media que empuja la chatarra, la estructura se cierra y comienza a coger temperatura, permitiendo que la chatarra se vaya precalentando antes que ingrese al horno de fundición de arco eléctrico (EAF). La temperatura de precalentamiento está entre 300°C a 500°C.



Figura 5. Sistema de calentamiento Consteele y Horno de Arco Eléctrico.

Fuente y Autor: Marcozzi, M.; Guzzon, M.; «The evolution of preheating and the importance of the hot heel in supersized EAF systems». MPT 3/2011, pp. 82-91 [30].

³ **Chatarra compactada.** “Chatarra que ha sido procesada en prensas compactadoras para aumentar su densidad, para facilitar su transporte, almacenaje y utilización final” [29].

La chatarra precalentada ingresa por medio de una compuerta al horno de arco eléctrico, que trabaja por batch, cuyo proceso dura entre 45 min a 1 hora aproximadamente, y es fundida por el calor generado en un horno eléctrico, por medio de potentes arcos eléctricos derivados de un transformador fundidor, operación que se acelera con la utilización de quemadores de oxígeno y gas, convirtiendo la energía en calorífica, alcanzando una temperatura de fusión de 1.550 grados centígrados.

A continuación se da la etapa de calentamiento, donde se realiza la descarburación y desfosforación mediante adiciones apropiadas de insumos y fundentes, siendo el principal la cal que permite obtener una colada, y formar escoria que contiene elementos indeseables del proceso (como azufre o fósforo que disminuyen las propiedades mecánicas), que será la encargada de capturar los óxidos formados por la inyección de oxígeno al metal fundido. La inyección de oxígeno en el acero fundido se realiza para ajustar la química del metal y acelerar la fusión.

La escoria resultante de la fundición, constituida por impurezas del acero constituye un desecho del proceso, y es retirada por medio de una compuerta del horno. Un montacargas destapa la compuerta y se vierte la escoria en un sitio de almacenamiento temporal hasta que se enfríe, para posteriormente la empresa de recolección municipal la traslade hacia el Relleno Sanitario.

En esta etapa el acero alcanza temperaturas de 1.680 grados centígrados aproximadamente mediante la incorporación de agregados como la antracita que también ayuda a limpiar la colada, y antracita malla 20 que ayuda a mantener el material refractario, y adicionar otros elementos que le dan al acero las cualidades específicas requeridas.

Producto de la fundición de la chatarra se obtiene acero líquido o también llamado colada; que por medio de una buza (válvula) se vierte parte del acero líquido del

horno basculante hacia la cuchara refractaria. Durante el vaciado se vuelven a incorporar a la colada otros insumos y fundentes, que permitirán la desoxidación y obtención de la primera aleación. En esta etapa se hace un ajuste de hasta el 80%, para en la siguiente fase (horno de afino) darle la composición final al acero.

Inmediatamente la cuchara refractaria de colada es transportada por medio de un puente grúa hacia el Horno de Afino conocido también como Horno de Cuchara, en donde se realizan los ajustes de composición química del baño fundido, mediante la incorporación de ferroaleaciones como ferrosilicio, ferrosilico manganeso, que son las que le dan la composición final al acero, se eliminan las impurezas y elementos indeseables, y se le da la temperatura necesaria para ser colado.

La cuchara es transportada mediante una grúa aérea a la Máquina de Colada Continua (MCC) y es colocada en la artesa receptora de colada continua, que en el fondo posee una buza u orificio que permite el vaciado del acero líquido en varios moldes de fondo desplazable llamados lingoteras, cuya sección transversal tiene la forma geométrica de palanquilla.

El enfriamiento se realiza de manera controlada, utilizando para ello agua que es suministrada por medio de duchas a manera de rocío de agua, que a su vez permite el conformado del producto (solidificación). Mientras el semi-producto es transportado por medio de un sistema de rodillos que opera a una velocidad de 2 metros/min, se utiliza aire a presión para continuar bajando la temperatura y posteriormente cortar las palanquillas mediante estaciones de corte por oxígeno a las longitudes deseadas.

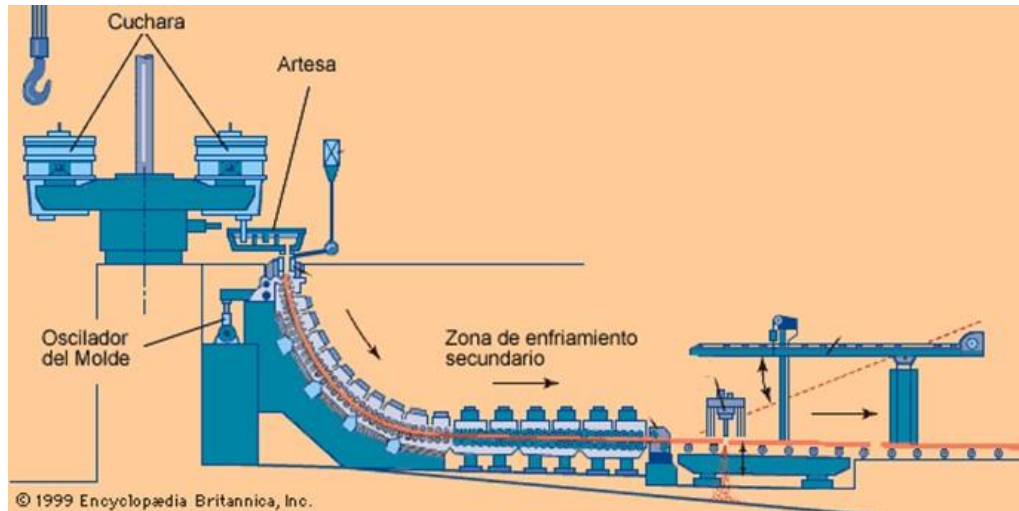


Figura 6. Esquema de la Máquina de Colada Continua

Fuente y Autor: Enciclopedia Británica, Inc [31].

Producto del enfriamiento de las palanquillas, se obtiene un residuo llamado laminilla. La capa externa de la palanquilla es la primera en enfriarse, mientras que su núcleo continúa a alta temperatura; siendo almacenadas al aire libre, dispuestas sobre madera, hasta que se enfríen para poder apilarlas.

Una vez obtenido el sub-producto palanquilla SAE-1029, se realiza un proceso de inspección de las propiedades físicas y se realiza la respectiva identificación del lote. Las dimensiones de la palanquilla son de 130 x 130 mm. de sección, y 4 metros de longitud.

3.3.2.1. Horno de Arco Eléctrico

El horno eléctrico está conformado por un amplio recipiente cilíndrico, cubierto por material refractario que forma la solera y contiene el baño de acero líquido y escoria. Está equipado con un techo refractario por donde se introducen 3 electrodos de grafito que se desplazan verticalmente y hacia abajo a medida que se van consumiendo, cuya carga metálica se funde con calentamiento resistivo generado por corriente eléctrica que fluye entre los electrodos y a través de la carga [32].

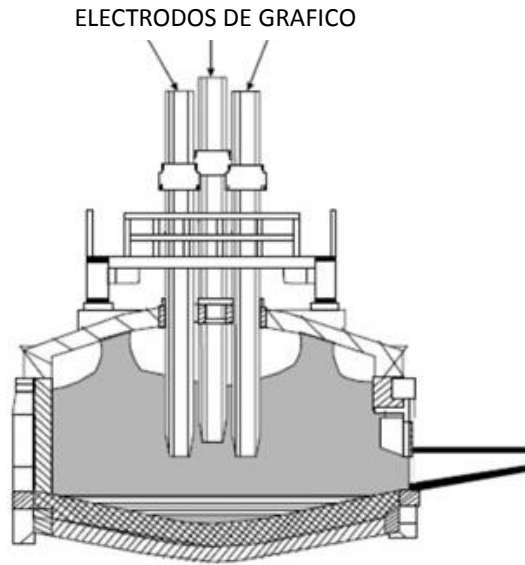


Figura 7. Horno de arco eléctrico para fundición de acero (vista interior)

Fuente y Autor: NORMA EPA AP-42 [32].

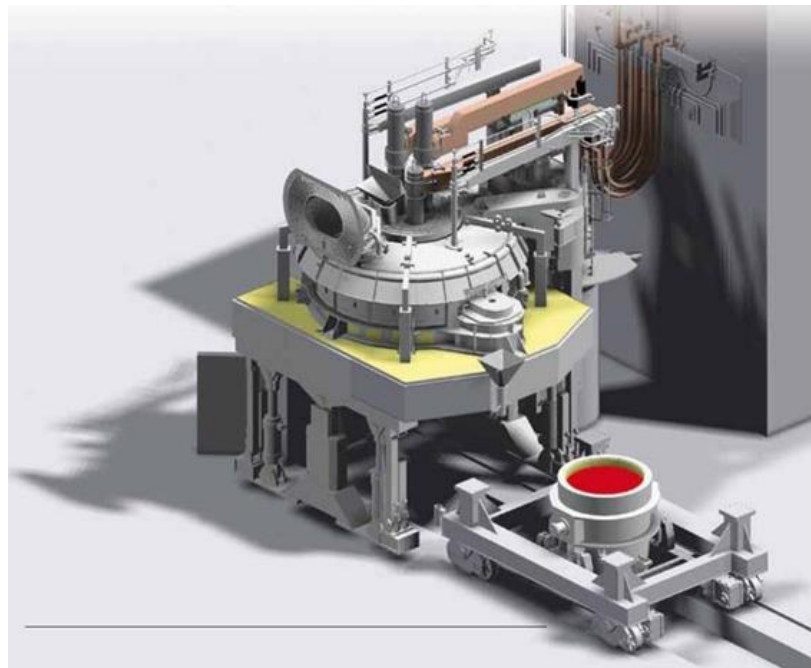


Figura 8. Horno de arco eléctrico y cuchara refractaria

Fuente y Autor: Metallon, Argentina.

https://www.researchgate.net/publication/279752109_El_impacto_de_las_recientes_innovaciones_en_los_hornos_electricos_de_arco [33].

Las siguientes capas interiores del horno poseen paneles enfriados por agua. La bóveda de esta clase de hornos es desplazable con la finalidad de que la chatarra sea

cargada por medio de unas cestas. La bóveda cuenta con otro orificio que permite la extracción de los gases de combustión hacia una planta de humos y polvos.

El horno está asentado sobre una estructura oscilante, que le permite realizar movimientos oscilatorios; es decir bascular para vaciar el acero líquido en la cuchara, y asimismo descargar la escoria. El sistema que permite el movimiento basculante del horno está constituido por una unidad hidráulica que opera con dos bombas de presión, una bomba para circulación de aceite y tanques acumuladores de nitrógeno que mantienen la presión necesaria para las oscilaciones. La operación de inclinación del horno para verter el acero fundido se conoce como "tapping".

3.3.3. Funcionamiento del Sistema de Extracción de Gases y Material Particulado

Las emisiones de las operaciones de manipulación y preparación de materias primas para incorporación en el proceso de fundición y afino, son consideradas partículas fugitivas. Los gases y material particulado que se escapan en el proceso de fundición, tanto del horno de arco eléctrico como del horno de afino u horno cuchara, son extraídos por medio de electro-ventiladores hacia una planta de humos y polvos.

El horno eléctrico de fusión o arco eléctrico, en una de las salidas de su bóveda, cuenta con un orificio que permite la captación de los gases de combustión, que son extraídos por medio de tuberías y captados por el sistema de extracción de gases, donde son depurados previa descarga a la atmósfera. Entre los gases que emite este tipo de fuentes y que son captados por la planta de humos se encuentran el dióxido de azufre y monóxido de carbono.

De acuerdo a la norma "United States Environmental Protection Agency EPA AP-42", las emisiones de los hornos de fusión están formadas por material particulado, monóxido de carbono, compuestos orgánicos, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y pequeñas cantidades de cloruros y fluoruros. El material particulado, los cloruros y

fluoruros, son generados por el flujo; mientras que la chatarra contiene compuestos orgánicos volátiles (COV's) y partículas de suciedad, junto con fósforo oxidado, silicio y manganeso. Además, los productos orgánicos en la chatarra y los aditivos de carbono aumentan las emisiones de monóxido de carbono CO [29].

Existen también constituyentes de trazas tales como níquel, cromo hexavalente, plomo, cadmio y arsénico. Las más altas concentraciones de emisiones del horno ocurren cuando las tapas y las puertas del horno se abren durante la carga, separación de oxígeno, eliminación de escoria y operaciones de vaciado. Estas emisiones escapan a la nave de acería, y son ventiladas a través de las rejillas de ventilación del techo donde se ubican electro-ventiladores. Los controles de las emisiones durante las operaciones de fusión y refinación se centran en ventilar los gases y vapores del horno directamente al sistema de control y recolección de emisiones (planta de humos y polvos) [29].

Los controles para emisiones fugitivas de hornos involucran el uso de campanas de techo cerca de las puertas del horno, para recolectar emisiones y dirigirlas al sistema de control de emisiones. Los sistemas de control de emisiones comúnmente utilizados para controlar las emisiones de partículas de los hornos de arco eléctrico y de inducción son filtros de bolsas (bag filters), ciclones y depuradores de venturi [29].

3.3.3.1. Sistema de enfriamiento de Agua Industrial utilizada en Acería

El sistema de enfriamiento del agua utilizada en el proceso de acería tiene la finalidad de absorber el calor del agua. Al proceso ingresa agua fría y regresa caliente; el sistema está conformado por bombas eléctricas que conducen el agua hacia las torres de enfriamiento que utilizan energía eléctrica para activar los ventiladores que son los encargados de enfriar el agua para volver a utilizarla en el proceso.

Previo al enfriamiento, el agua que proviene del proceso pasa por una piscina de decantación, y de ser necesario es ablandada para que sea apta su reutilización.

3.4. Laminación en Caliente

El semi-producto palanquilla no puede utilizarse directamente, por lo que es necesario transformarla en un producto comercial, y esto se logra en la laminación en caliente, que consiste en hacer pasar la palanquilla precalentada entre rodillos que giran a alta velocidad y en sentido contrario, reduciendo de esta manera su sección transversal debido a la presión ejercida por estos.

En este proceso, la palanquilla ingresa fría al horno de recalentamiento, el mismo que calienta la materia prima por medio de quemadores que combinan el bunker como combustible y aire comprimido para formar la llama.

El horno opera a temperaturas comprendidas entre 800 °C a 1200 °C, y consta de tres zonas:

- Zona 1: o zona de precalentamiento, constituida por ocho quemadores y consumiendo el 48% de la energía total.
- Zona 2: o también llamada zona de calentamiento, conformada por ocho quemadores y el 43% de energía; y,
- Zona 3: o zona de homogenización, que cuenta con cuatro quemadores y 9% de la energía total.

El paso de las palanquillas por las diferentes zonas se realiza por medio de distintos dispositivos de avance como rodillos. En el interior del horno se crea una atmósfera oxidante para reducir al máximo la formación de cascarilla. Posteriormente las palanquillas al rojo vivo pasan por una mesa transportadora para ingresar al tren de laminación compuesto por tres fases:

- **Tren de desbaste:** Tiene la finalidad de reducir el espesor de la palanquilla a 63 x 57 mm., mediante el uso de rodillos rotatorios de forma cilíndrica,

produciendo productos semielaborados. La palanquilla sufre una primera pasada muy ligera para romper y eliminar una capa de cascarilla que se forma durante su permanencia en el horno de recalentamiento.

Posteriormente pasa por la primera cizalla donde se realiza el despunte del material, para evitar que las fases siguientes no puedan realizarse por una pérdida de temperatura que pueda incidir directamente en el terminado del producto.

- **Tren intermedio:** Formado por distintas cajas, permite reducir aún más la sección del producto, pasando en esta etapa por la segunda cizalla en 24 mm.
- **Tren acabador:** El proceso experimenta su última pasada por cajas, obteniendo su geometría de corrugado.



Figura 9. Tren de Laminación en Caliente

Fuente y Autor: Dossier Tecnológico.

<http://es.slideshare.net/tejadaarreaga/4-barras-de-refuerzo-para-la-construccion> [34].

El producto pasa por una placa de enfriamiento, por una tercera cizalla que corta en la longitud comercial y endereza el producto hasta obtener una varilla corrugada de acero SAE-1029, con las siguientes dimensiones:

Diámetro: 12 mm
Longitud: 12 metros
Peso: 10,656 kg.

El producto final varilla, es revisado empacado almacenado previo despacho para comercialización. Para el presente proyecto se ha considerado la fabricación de la varilla de acero SAE-1029. La figura que se presenta a continuación, esquematiza el flujo del proceso.

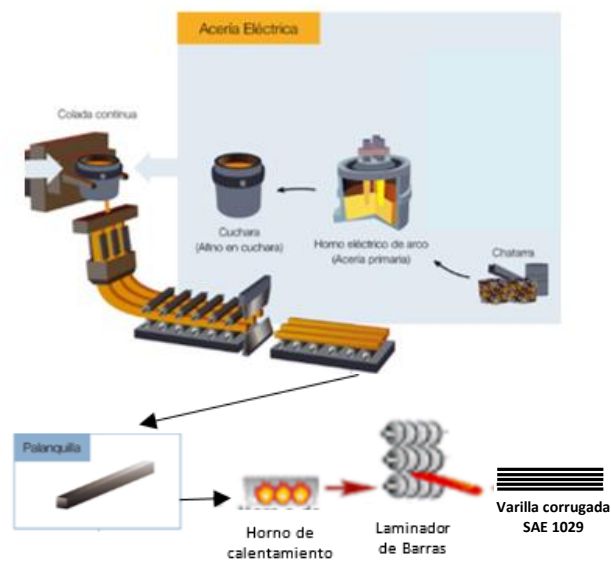


Figura 10. Esquema del flujo de proceso de la varilla de acero.

Fuente y Elaboración: Hornos industriales EXPO / Metalurgia y Tecnología Mecánica.

<https://www.emaze.com/@ALZCLLRT/hornos-industriales-expo.pptx>.

<http://metalurgica-tecnologiamecanica.blogspot.com/2016/04/normal-0-21-false-false-false-es-ar-x.html> [35].

3.4.1. Sistema de enfriamiento de Agua Industrial utilizada en Laminación en Caliente

El agua circula pasando por un sistema de enfriamiento, conformado por un tratamiento termo mecánico, utilizando el agua en las líneas de temple, obteniendo buenas propiedades mecánicas a las barras, mejorar la ductilidad, soldabilidad y mayor fuerza de rendimiento.

Luego del proceso de laminación, el agua es conducida a una piscina de decantación, donde se separa el agua de la laminilla (lodos). El agua pasa por un sistema de bombeo que distribuye el agua utilizada en el proceso a las torres de enfriamiento, que mediante ventiladores enfrían el agua, pasando luego a una cisterna de baja temperatura, para retomar el flujo al proceso de laminación. Existen 2 torres de enfriamiento:

- 1) *Torre de mayor capacidad*, donde funcionan 2 ventiladores de gran tamaño y contiene agua tipo B (menos limpia).

- 2) *Torre de menor capacidad*, donde un ventilador ubicado en la parte superior de la torre enfría la masa de agua. Esta torre contiene agua tipo A, que tiene mejores características.

3.5. Diagrama de Flujo del Proceso de Fabricación de la Varilla de Acero 1029 para construcción.

En el anexo 1 se presenta el diagrama de flujo de proceso de fabricación de la varilla de acero 1029 para construcción.

CAPÍTULO IV.

4. ANÁLISIS DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (AICV)

4.1. Descripción de los Datos de Inventario

Esta fase consiste en realizar un inventario de los datos de entrada y salida del proceso de fabricación de varilla de acero SAE 1029, considerando los límites del sistema indicados en la figura 4 del capítulo 3, para cumplir los objetivos del estudio.

En el análisis del inventario del ciclo de vida se cuantificaron los consumos de materias primas, insumos, agua, energía, combustibles, productos obtenidos en cada fase, residuos y emisiones, y se realizó la asignación de datos de acuerdo a los balances de materia y energía de los procesos unitarios [13].

Se utilizó el software Sima Pro, desarrollado por la Pre-Consultants (Product Ecology Consultants) para el ingreso de los datos validados, y se realizaron cálculos para llevar los datos a las unidades requeridas por el software. Los datos del análisis de inventario de ciclo de vida fueron obtenidos a partir de varias fuentes de datos tales como Ecoinvent [36], EPA AP-42 [32], entre otras. Los procesos que se utilizaron de las bases de datos seleccionadas, fueron analizados detenidamente, con la finalidad de escoger aquellos procesos que tengan condiciones similares a las requeridas para el presente estudio.

A continuación se presentan los datos de inventario para cada una de las fases definidas en los límites del sistema.

➤ Fase de Clasificación de Chatarra

Tabla 3. Datos de Inventario de la Fase de Chatarra Clasificada

Descripción	Cantidad	Unidad	Comentarios
Total de Chatarra Procesada	121.977,78	Ton	
Chatarra procesada en Prensa Cizalla	80.604,56	Ton	
Chatarra procesada por otros equipos	41.373,22	Ton	Equipos de oxicorte
Materiales No Ferrosos (Aluminio, cobre, bronce, etc.)	262,65	Ton	Se destinan a la venta
Entradas			
Transporte de chatarra a Planta de Acería	37906044	tkm	Se consideró 300 km de transporte hasta a planta.
Consumo de diésel	16.528.755,00	MJ	Utilizado por maquinarias y equipos que manipulan chatarra en patio. No se incluyó consumo de grasas por ser un valor despreciable.
Consumo de gas propano	6.435,00	kg	Usado en oxicorte
Consumo de oxígeno líquido	123.629,69	kg	Utilizado en oxicorte
Energía eléctrica para procesamiento de chatarra.	1.113.741,41	KWh	90% de la energía es consumida por prensa cizalla; el 10% restante se atribuye a servicios auxiliares.
Salidas			
Material no metálico	4.113,05	Ton	Impurezas, tierra, basura, plásticos.

Fuente: Datos proporcionados por una empresa de Guayaquil.

Elaboración: Autor.

Los materiales no ferrosos como aluminio, cobre, bronce, citados en la tabla 3, no son útiles para el proceso de fabricación de varilla de acero SAE 1029, ya que son metales que no aportan a la fundición porque no contienen hierro en cantidades apreciables; por lo que son reciclados y vendidos a empresas que los utilizan como materias primas para otros procesos. En el modelo de inventario se incluye la producción evitada de aluminio conseguida en el sistema estudiado.

➤ **Fase de Obtención de Palanquilla SAE 1029**

Tabla 4. Datos de Inventario de la Fase de Obtención de Palanquilla SAE 1029 (Acería)

Descripción	Cantidad	Unidad	Comentarios
Total de Palanquilla SAE 1029	157.006,23	Ton	Producida a partir de chatarra clasificada y dosificada.
Entradas			
Total de chatarra clasificada	179.603,28	Ton	Chatarra tipo A, B, C e importada.
Transporte de Chatarra clasificada para procesamiento en Acería.	71.841,31	tkm	Transporte en camiones de 16 a 32 ton., considerando una distancia de 400 m
Ferrosilicio	336,93	Ton	Insumos y ferroaleaciones de fundición y ajuste de colada.
Ferrosilicio manganeso	2.479,99	Ton	Insumos y ferroaleaciones de fundición y ajuste de colada.
Antracita	410,72	Ton	Insumos de fundición.
Electrodos de grafito	638,11	Ton	Insumos de fundición.
Argón industrial	76,20	Ton	Insumos de fundición.
Nitrógeno industrial	19,87	Ton	Insumos de fundición.
Oxígeno líquido industrial	8.818,77	Ton	Insumos de fundición.
Espato fluor	42,73	Ton	Fundentes
Antracita M-20	1.654,72	Ton	Fundentes
Cal dolomita	4.689,20	Ton	Fundentes
Cal viva	5.045,43	Ton	Fundentes
Desulfurante	207,04	Ton	Insumo
Carburo de calcio	65,90	Ton	Fundentes
Lingote de aluminio	6,75	Ton	Fundentes
Estrella de aluminio	25,5	Ton	Fundentes
Lubricantes-aceites (incluido aceites de colada continua)	141,06	Ton	Incluido consumo de aceites de máquina de colada continua.
Total de consumo de agua tratada (agua blanda)	174.822,00	Ton	
Consumo de Energía Eléctrica para producción de palanquilla SAE-1029	105.348.826,36	KWh	

Salidas			
Óxidos de nitrógeno	17.960,33	Kg	Emisiones del horno de arco eléctrico [32].
Partículas Totales	1.167.421,32	kg	
Dióxido de carbono (CO ₂)	12.560.498,4	kg	Emisiones por electrodos de horno de arco eléctrico [37].
Total de Polvos capturados	3.806,50	Ton	Destino: Relleno de Seguridad
Escoria más laminilla	23.240,98	Ton	Destino: Relleno sanitario Las Iguanas

Fuente: Datos proporcionados por una empresa de Guayaquil.

Elaboración: Autor.

➤ **Fase de Obtención de Varilla SAE 1029**

Tabla 5. Datos de Inventario de la Fase de Obtención de Varilla SAE 1029 (Laminación en Caliente)

Descripción	Cantidad	Unidad	Comentarios
Total de Varilla SAE 1029	136.510,09	Ton	Producida a partir de palanquilla.
Entradas			
Transporte en montacargas a diésel.	9.885,91	tkm	Capacidad: 3 a 10 toneladas. Distancia: 70 metros.
Total de Palanquilla SAE 1029 para obtención de varilla.	141.227,32	Ton	
Consumo de búnker	188.357.989,05	MJ	Consumo en horno de precalentamiento palanquilla
Lubricantes-aceites	26,3987558	Ton	Incluye consumo de grasas
Total de consumo de agua tratada (agua blanda)	39.287,16	Ton	
Consumo de Energía eléctrica	20.250.206,09	KWh	Consumo de Laminación en Caliente.
Salidas			
Laminilla	760,95	Ton	Desecho no peligroso que se envía a relleno sanitario Las Iguanas.

Fuente: Datos proporcionados por una empresa de Guayaquil.

Elaboración: Autor.

4.2. Fuentes de Datos Utilizadas

En las siguientes tablas se muestran las fuentes de datos utilizadas en este proyecto.

Tabla 6. Fuentes de Datos para la Fase de Chatarra Clasificada

Materiales / Combustibles	Nombre en SimaPro	Fuente
Transporte de chatarra reciclada hacia una planta de acería (distancia 300 km), vehículos de 16 a 30 ton.	Transport, lorry 16-32t, EURO3/RER U	Ecoinvent unit processes (versión 2.2)
Diésel de maquinarias que manipulan chatarra en patio de procesamiento.	Diesel, burned in building machine/GLO U	Ecoinvent unit processes (versión 2.2)
Electricidad/calor		
Consumo de Energía Eléctrica	Electricity, at supply, 2012 average loss	Electricity Ecuador
Consumo de Gas Propano	Propane {GLO} market for Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation default - unit
Consumo de Oxígeno Líquido	Oxygen, liquid {RER} market for Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation default - unit
Generación de desechos sólidos		
Tierra, plásticos, madera, etc.	Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U	Ecoinvent unit processes (versión 2.2)

Fuente: Ecoinvent Database, Electricity Ecuador.

Elaboración: Autor.

Tabla 7. Fuentes de Datos para la Fase de Obtención de Palanquilla SAE 1029

Materiales / Combustibles	Nombre en SimaPro	Fuente
Chatarra clasificada	Chatarra clasificada	Electricity Ecuador
Transporte de chatarra clasificada a nave de acería (recorrido: 400 m)	Transport, lorry 16-32t, EURO3/RER U	Ecoinvent unit processes (versión 2.2)
Ferrosilicio	Ferrosilicon {RoW} production Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation default - unit
Ferrosilicio manganeso	Ferromanganese, high-coal, 74.5% Mn, at regional storage/RER U	Ecoinvent unit processes (versión 2.2)
Antracita	Anthracite coal, combusted in industrial boiler/RNA	USLCI (versión 1.6)
Electrodos de grafito	Graphite {GLO} market for Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation default - unit

Desulfurante	Calcium carbide, technical grade {RoW} production Alloc Rec, U	Ecoinvent 3 - allocation, recycled content - unit
Argón industrial	Argon, liquid, at plant/RER U	Ecoinvent unit processes (versión 2.2)
Nitrógeno industrial acería	Nitrogen, liquid, at plant/RER U	Ecoinvent unit processes (versión 2.2)
Oxígeno líquido industrial	Oxygen, liquid, at plant/RER U	Ecoinvent unit processes (versión 2.2)
Aceites y lubricantes	Lubricant oil	Ecoinvent 3 - allocation default - unit
Espato fluor	Fluorspar, 97%, at plant/GLO U	Ecoinvent unit processes (versión 2.2)
Cal Dolomita	Dolomite, at plant/RER U	Ecoinvent unit processes (versión 2.2)
Carburo de calcio	Calcium carbide, technical grade {GLO} market for Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation default - unit
Lingotes de aluminio	Aluminium, primary, ingot {CA-QC} production Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation default - unit
Cal viva	Quicklime, milled, loose {GLO} market for Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation default - unit
Estrella de aluminio	Aluminum, secondary, extruded/RNA	USLCI (versión 1.6)
Consumo de Agua Blanda para proceso acería	Water, completely softened, from decarbonised water, at user {GLO} market for Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation default - unit
Electricidad / calor		
Consumo de energía eléctrica de Acería	Electricity, at supply, 2012 average loss	Electricity Ecuador
Emisiones al aire		
Óxidos de nitrógeno	Nitrogen oxides	EPA EP-42
Partículas Totales	Particulates, unspecified	EPA EP-42
Dióxido de carbono	Carbon dioxide	IPCC
Generación de desechos sólidos		
Escoria y laminilla	Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U	Ecoinvent unit processes (versión 2.2)
Polvos capturados de Planta de Humos	Disposal, hazardous waste, 0% water, to underground deposit/DE U	Ecoinvent unit processes (versión 2.2)

Fuente: Ecoinvent Database, USLCI, Electricity Ecuador.

Elaboración: Autor.

Tabla 8. Fuentes de Datos para la Fase de Obtención de Varilla SAE 1029

Materiales / Combustibles	Nombre en SimaPro	Fuente
Palanquilla SAE 1029 para elaboración de varilla	Palanquilla SAE 1029 para elaboración de varilla	Electricity Ecuador
Transporte de palanquillas en montacargas a diésel, hacia laminación (distancia: 70 m)	Transport, combination truck, average fuel mix/US	USLCI (versión 1.6)
Búnker consumo por horno de precalentamiento	Heavy fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/CH U	Ecoinvent unit processes (versión 2.2)
Aceites y Lubricantes	Lubricating oil {GLO} market for Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation default - unit
Consumo de agua tratada en proceso de laminación en caliente	Water, completely softened, from decarbonised water, at user {GLO} market for Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation default - unit
Electricidad / calor		
Consumo de energía eléctrica de Proceso de Laminación en Caliente	Electricity, at supply, 2012 average loss	Electricity Ecuador
Generación de desechos sólidos		
Laminilla generada en tren de laminación	Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U	Ecoinvent unit processes (versión 2.2)

Fuente: Ecoinvent Database, USLCI, Electricity Ecuador.

Elaboración: Autor.

CAPÍTULO V.

5. EVALUACIÓN DE IMPACTO DEL CICLO DE VIDA (EICV) DE LA VARILLA DE ACERO SAE 1029

5.1. Metodología e indicadores seleccionados

Para efectos del presente estudio se utilizó el software Sima Pro [38], desarrollado por la Pre-Consultants (Product Ecology Consultants) en los Países Bajos; que permitió evaluar el impacto ambiental del ciclo de vida mediante el cálculo de flujos de entrada y salida, considerando los límites del sistema. El software contiene una amplia base de datos de Ecoinvent versión 3.0.2.1. [7, p. 144].

Para la evaluación de impacto del ciclo de vida se utilizó el método CML 2002 (Centre of Environmental Science of Leiden University). *“Para cada categoría de impacto, un indicador de categoría puede calcularse sobre la base del modelo de caracterización aplicable y los factores de caracterización derivados del modelo subyacente”* [39, p. 44]. Para el presente estudio, las categorías de impacto consideradas y su factor de caracterización se indican en la siguiente tabla:

Tabla 9. Factores de caracterización y unidades de indicador de impacto del método CML 2000.

Categoría de impacto	Factor de caracterización	Unidad del indicador
Agotamiento abiótico	Potencial de agotamiento abiótico.	Kg (Sb eq)
Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)	Potencial de agotamiento abiótico por combustibles fósiles.	MJ
Cambio climático	Potencial de calentamiento global.	Kg (CO ₂ eq)
Agotamiento de la capa de ozono	Potencial de agotamiento del ozono.	Kg CFC-11 eq
Formación de oxidantes fotoquímicos	Potencial de creación de oxidantes fotoquímicos.	Kg (C ₂ H ₄ eq)
Acidificación	Potencial de acidificación.	Kg (SO ₂ eq)
Eutrofización	Eutrofización.	Kg (PO ₄ eq)

Fuente: SimaPro CML-2002 versión 3.2.

Elaboración: Autor.

Agotamiento de Recursos

Los recursos pueden ser divididos en renovables y no renovables [40] o en abióticos y bióticos. El agotamiento abiótico puede definirse como la disminución de la disponibilidad de recursos naturales [41].

Existen varios métodos de caracterización para recursos abióticos, pero surge la necesidad de investigar más sobre los recursos bióticos renovables. Modelos de caracterización por agotamiento de reservas bióticas pueden estar basadas en el tamaño de las reservas abióticas, la extracción y tasas de regeneración [41].

Calentamiento Global (Global Warming Potential)

El calentamiento global o también llamado el "efecto invernadero", es el efecto del aumento de la temperatura en la atmósfera inferior a un nivel por encima de lo normal, que es calentada normalmente por la radiación entrante del sol. Parte de la radiación se refleja normalmente desde la superficie de la tierra u océanos. El contenido de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), dióxido de nitrógeno (NO₂), clorofluorocarbonos, etc., reflejan en la atmósfera la radiación infrarroja, dando como resultado el efecto invernadero [42].

Dentro de las consecuencias del calentamiento global se pueden citar el aumento del nivel de temperatura que puede resultar en cambios climáticos regionales, el aumento de temperatura en los océanos y al derretimiento de los polos y glaciares, que conlleva a niveles elevados del mar [42].

El dióxido de carbono (CO₂) no es el único gas causante del cambio climático, sino también el metano (CH₄), clorofluorocarbonos (CFCs), óxidos de nitrógeno (NO_x) y otras trazas de gases que también son absorbidos por la radiación infrarroja. En el caso de los aerosoles, que están formados por dióxido de azufre (SO₂), dichas emisiones pueden causar un efecto de enfriamiento [7, pp. 149-150].

El cambio climático puede llevar a una amplia gama de impactos sobre los ecosistemas y sociedades, pero los gases de efecto invernadero tienen una propiedad en común que es muy útil para los modelos de caracterización de análisis de ciclo de vida; que está basada en la incidencia de la radiación en la atmósfera, su capacidad de absorción de la radiación infrarroja y el efecto de calentamiento producido en la atmósfera [7].

El potencial de calentamiento global es expresado en kilogramos de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂ eq), y ha sido calculado para diferentes horizontes de tiempo en un intervalo de tiempo: 20 años, 100 años y 500 años [7, p. 510].

Agotamiento de la Capa de Ozono

El ozono O₃ es perjudicial en la baja atmósfera porque provoca daños a las plantas, a la salud de las personas y al entorno; pero es una sustancia esencial en la atmósfera superior llamada estratósfera, donde se produce el 99% de la radiación ultravioleta dañina proveniente del sol. El agotamiento de ozono se refiere al adelgazamiento de la capa de ozono estratosférico, como resultado de varias sustancias o emisiones que incluyen los cloro fluoro carbonos (CFCs), hidroclorofluorocarburos (HCFCs), Tetraclorometano (CCl₄), halones [7, p. 150].

El ozono estratosférico actúa como un filtro que protege la tierra de la radiación ultravioleta entrante (UV). La descomposición del ozono se ve reforzada por la entrada de compuestos halogenados antropogénicos a la estratósfera, como los CFCs, HCFCs, halones, etc. Los compuestos orgánicos halogenados son relativamente estables y por lo tanto una cantidad considerable alcanza la estratósfera antes de que éstos se descompongan. En la estratósfera, bajo la influencia de la radiación UV se descomponen en cloro y bromo. Los óxidos de nitrógeno, óxidos de hidrógeno, metano, cloro y bromo actúan como agentes catalizadores en la descomposición del ozono [42].

La presencia de la capa de ozono estratosférico es fundamental para la vida en la Tierra, ya que el ozono absorbe la radiación UV. La descomposición de la capa de ozono estratosférica causará una mayor radiación UV entrante (especialmente radiación UV-B) que conduce a impactos en seres humanos tales como cáncer de piel, cataratas y disminución de la defensa inmunológica.

El aumento de la radiación UV también tiene un impacto en organismos y ecosistemas naturales. El potencial de agotamiento del ozono se expresa en kg CFC-11 equivalente [42].

Formación de Oxidantes Fotoquímicos

Los oxidantes fotoquímicos son contaminantes secundarios que se forman en la atmósfera inferior de los NO_x e hidrocarburos, en presencia de luz solar. Los NO_x reaccionan con los compuestos orgánicos volátiles (COV's), para producir ozono troposférico.

El monóxido de carbono también puede contribuir a la formación de ozono que es uno de los más importantes foto-oxidantes. El Potencial de creación de oxidantes fotoquímicas se expresa en kg equivalentes de etileno [7].

Acidificación

Es el proceso de introducción de sustancias ácidas al ambiente, a causa de las emisiones a la atmósfera de óxidos de nitrógeno NO_x y óxidos de azufre SO_x, provenientes principalmente de la quema de combustibles fósiles. Estos óxidos reaccionan con el vapor de agua que está presente en el aire, convirtiéndose en compuestos ácidos que la lluvia se encarga de precipitarlos y regresarlos a la tierra en forma de lluvia ácida, que al tener contacto con algún cuerpo de agua, altera el pH provocando la alteración de ecosistemas acuáticos.

Los principales contaminantes acidificantes son el SO₂, NO_x, HCl y NH₃. La lluvia ácida es una de las formas en la que ocurre la deposición ácida. La niebla, nieve también atrapan y depositan contaminantes atmosféricos [7]. El potencial de acidificación se expresa en kilogramos equivalentes de SO₂.

Eutrofización

La eutrofización es la pérdida oxígeno del agua por enriquecimiento de nutrientes que alteran los ecosistemas acuáticos, por el exceso de nitrógeno y fósforo, propiciando el crecimiento de algas y plantas acuáticas que deterioran la calidad del agua y el hábitat de especies acuáticas y bióticas. El potencial de eutrofización está expresado en kg equivalentes de PO₄ [42].

5.2. Resultados de Caracterización del Análisis de Ciclo de Vida de la Varilla de Acero SAE-1029

5.2.1. Resultados de caracterización de las Fases de Preparación de Chatarra Clasificada, Palanquilla SAE 1029 y Varilla SAE 1029

La tabla 10 muestra los resultados de caracterización por categoría de impacto por cada uno de los procesos; es decir: Procesamiento y Clasificación de Chatarra; Obtención de Palanquilla a partir de Chatarra Clasificada (Proceso de Acería); y, Obtención de Varilla SAE 1029 a partir de Palanquilla (Proceso de Laminación en Caliente). La última columna representa los resultados totales de caracterización de las tres fases analizadas: Chatarra Clasificada, Palanquilla SAE 1029 y Varilla SAE 1029; que corresponden a todos los procesos necesarios que llevan a la obtención de varilla de acero SAE 1029 para construcción.

Tabla 10. Resultados de Caracterización de Impacto de las Fases de Chatarra Clasificada, Palanquilla SAE 1029 y Varilla SAE 1029

Categoría de impacto	Unidad	Chatarra Clasificada	Obtención de Palanquilla a partir de Chatarra Clasificada	Obtención de Varilla a partir de Palanquilla	Total
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	3,39E-07	2,05E-05	9,99E-07	2,18E-05
Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)	MJ	47,98	3818,13	558,27	4.424,38
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	56,27	473,91	183,35	713,54
Agotamiento capa de ozono	kg CFC-11 eq	1,13E-05	3,46E-05	3,09E-05	7,68E-05
Oxidación fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	0,003	0,19	0,06	0,25
Acidificación	kg SO ₂ eq	0,35	4,73	1,49	6,58
Eutrofización	kg PO ₄ eq	0,07	0,58	0,11	0,76

Fuente: SimaPro CML-2002 versión 3.2.

Elaboración: Autor.

Con los resultados obtenidos, la figura 11 representa el análisis de contribución para la varilla de acero SAE 1029, siendo la fase de Obtención de Palanquilla de Acero SAE 1029 a partir de chatarra clasificada -proceso que se lleva a cabo en Acería-, la que predomina en todas las categorías de impacto analizadas, cuyo porcentaje de aportación de impacto por agotamiento abiótico, agotamiento abiótico por combustibles fósiles, calentamiento global, oxidación fotoquímica, acidificación y eutrofización, se encuentran entre el 66% y 94%; mientras que la aportación para la categoría agotamiento de la capa de ozono fue del 45%.

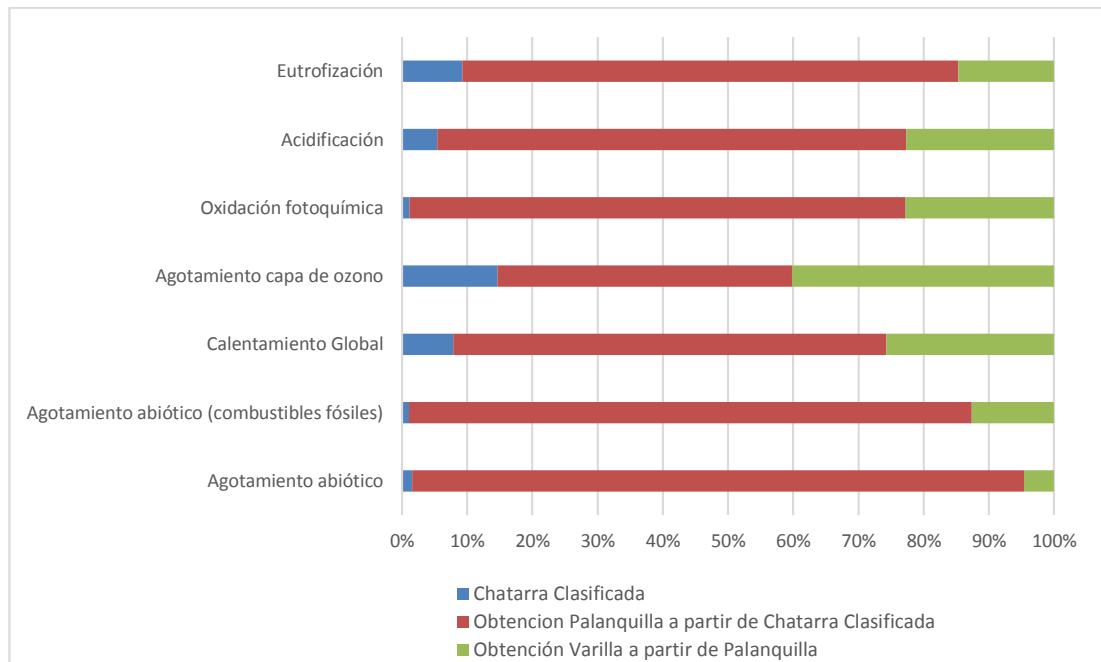


Figura 11. Contribución por fase de la Caracterización de Impacto de la Fabricación de Varilla de Acero SAE 1029

Fuente: CML 2002 versión 3.02.

Elaboración: Autor.

Agotamiento Abiótico

En la categoría de agotamiento abiótico, la etapa de obtención de chatarra clasificada aporta el 1,6% del total del impacto, que a su vez está representado en su mayoría por el empleo de oxígeno (92%) y en menor porcentaje por gas propano (8%), que se utilizan para las labores de oxicorte. Esta etapa está representada por las actividades con menor influencia en todas las categorías de impacto.

La etapa de obtención de palanquilla a partir de chatarra clasificada aporta el 94% del total; estando representados por el carburo de calcio, aceites lubricantes, cal viva y carburo de calcio los que aportan a la contribución por agotamiento abiótico en esta fase con el 39%, 23%, 12% y 11,7%% respectivamente.

Para la etapa de obtención de varilla SAE 1029 a partir de palanquilla, el proceso representa el 4,6% del total, aportando en su mayoría a este porcentaje el consumo

de aceites, lubricantes y grasas (96%) necesarios para el proceso de laminación en caliente.

La razón por la que la etapa de obtención de chatarra clasificada aporta un menor impacto respecto al resto de fases, es porque la base para la fabricación de varilla de acero es la chatarra ferrosa reciclada, que no es un recurso que está siendo extraído directamente de la naturaleza.

Agotamiento Abiótico por Combustibles Fósiles

La etapa de clasificación de chatarra aporta el 1,08% al agotamiento abiótico por combustibles fósiles. Dicho porcentaje está representado principalmente por electricidad en un 79%, consumo de oxígeno (12,7%) y consumo de gas propano para actividades de oxicorte el 6,4%.

La fase de obtención de palanquilla a partir de chatarra clasificada aporta el 86% a esta categoría. De este porcentaje, el 67% es contribuido por el consumo de energía eléctrica, el 16,8% se atribuye a la antracita, el 6,9% al ferro silicio, 5,2% a la cal viva como fundente en acería, y otras contribuciones en menores porcentajes.

Del total de contribuciones por categorías de impacto, la fase de obtención de varilla SAE 1029 a partir de palanquilla aporta el 12,6% al agotamiento abiótico por combustibles fósiles; porcentaje que lo representa en su mayoría el consumo de electricidad (97,1%) y el 2,8% el consumo de aceites, lubricantes y grasas que se requieren durante el proceso.

Calentamiento Global

De todas las categorías de impacto analizadas en la fase de obtención de chatarra clasificada, la contribución al calentamiento global representa el 7,89%; porcentaje que está atribuido al transporte de vehículos pesados para trasladar la chatarra reciclada hacia la planta, con una representación del 78,1%. El 16,9% lo aporta el

diésel de máquinas y equipos que manipulan la chatarra en el patio de procesamiento, el 4,4% el consumo de electricidad, el 0,6% al consumo de oxígeno, el 0,6% a la generación de desechos no peligrosos, y el 0,1% al consumo de gas propano.

La etapa de obtención de palanquilla a partir de chatarra clasificada aporta el 66%, porcentaje que está representado por 51,4% a la energía eléctrica, el 17% al proceso anterior (elaboración de palanquilla SAE 1029), 10% al consumo de antracita, 7% a la producción de cal viva, y el 5% el oxígeno utilizado en el horno de arco eléctrico.

La fase de obtención de varilla SAE 1029 a partir de palanquilla, tiene una contribución aproximada del 25% para la categoría calentamiento global. A este porcentaje aportan en mayor proporción el consumo de búnker en el horno de precalentamiento de palanquilla (71,4%) y la electricidad utilizada en laminación en caliente para la fabricación de varilla (28,4%).

Agotamiento de la Capa de Ozono.

La fase de obtención de chatarra clasificada para esta categoría tiene una aportación del 14,7%. De este porcentaje, el transporte de chatarra hacia la planta mediante vehículos pesados representa el 81,9%, el 14% se debe al consumo de diésel de las máquinas que operan en el patio de procesamiento de chatarra, y en menores contribuciones la electricidad (3,3%), oxígeno (0,5%), gas propano (0,3%) y desechos no peligrosos (0,9%).

La etapa de obtención de palanquilla a partir de chatarra clasificada aporta el 45,11% a esta categoría, porcentaje que está representado por el consumo de energía eléctrica (79,2%) y la producción de cal (6,5%).

La fase de obtención de varilla a partir de palanquilla SAE 1029 tiene una contribución del 40,22% a la categoría agotamiento de la capa de ozono. A este porcentaje aportan

principalmente el búnker del horno de precalentamiento (80,3%) y la electricidad (19%).

Oxidación Fotoquímica

La categoría formación de oxidantes fotoquímicos, para la fase de obtención de chatarra clasificada, aporta el 1,15% del total de categorías de impacto, siendo representado este porcentaje del indicador al transporte de chatarra reciclada hacia la planta (69%), el consumo de diésel en las máquinas que manipulan la chatarra para procesamiento (19,4%), electricidad 10,8%, y en menos porcentajes de aportación el consumo de oxígeno (0,7%), desechos no peligrosos de esta etapa que son dispuestos en el relleno sanitario (0,7%) y consumo de gas propano (0,2%).

La fase de obtención de palanquilla a partir de chatarra clasificada tiene una contribución del 76,1% a la oxidación fotoquímica; cuyo porcentaje está representado principalmente por el consumo de electricidad (55%), consumo de antracita (19,7%), carburo de calcio (12,6%) y cal (3,5%).

En la etapa de obtención de varilla SAE 1029 a partir de varilla, el proceso contribuye a la categoría de impacto oxidación fotoquímica en un 22,75%, cuyo porcentaje lo aportan en su mayoría el búnker usado en el horno de precalentamiento (61%) y el consumo de electricidad el 39%.

Acidificación

Del total de categorías de impacto analizadas para la fase de obtención de chatarra clasificada, dicho proceso aporta el 5,4%; estando representado por el transporte de chatarra a la planta (66,4%), diésel empleado en las máquinas y equipos que manipulan la chatarra (22,8%), electricidad (10,3%), desechos no peligrosos (0,6%), oxígeno (0,5%) y gas propano (0,1%).

Para la fase de obtención de palanquilla SAE 1029 a partir de chatarra clasificada, se obtuvo el 72% de contribución a la categoría acidificación; porcentaje que está dado principalmente por el consumo de electricidad en acería (69%), el 20% al consumo de antracita y el empleo de oxígeno en fundición (2,4%).

La aportación a esta categoría por la fase de obtención de varilla SAE 1029 a partir de palanquilla, representa el 22,71% del total de este indicador, el mismo que lo aportan en el uso de búnker en el horno de precalentamiento de palanquilla (53,2%) y la energía eléctrica de todo el proceso de laminación en caliente (46,6%).

Eutrofización

En la etapa de obtención de chatarra clasificada, este proceso aporta el 9,3% del total de esta categoría de impacto, cuyas aportaciones están dadas en su mayoría por el transporte de vehículos cargados con chatarra reciclada (70,9%), el diésel de las máquinas y equipos que manipulan la chatarra (21,7%) y la electricidad (4,5%).

La fase de obtención de palanquilla SAE 1029 a partir de chatarra clasificada aporta el 76% del total de contribución por eutrofización; porcentaje que está representado principalmente por el consumo de energía eléctrica (60%), consumo de oxígeno para fundición (13,7%) y ferromanganeso (9,5%).

En cuanto a la fase de obtención de varilla SAE 1029 a partir de palanquilla, la contribución por este proceso representa el 14,7%, representado por el consumo de electricidad (66,4%) y el empleo de búnker en el horno de precalentamiento (33,1%).

5.2.2. Análisis de Contribución por Fases

5.2.2.1. Resultados de Caracterización de la Fase de Preparación de Chatarra Clasificada.

La tabla 11 muestra los resultados de caracterización de la Fase de Preparación de Chatarra, representados por los impactos ambientales de todos los procesos de esta etapa, desde el traslado de chatarra reciclada hasta una planta ubicada en Guayaquil, considerando una distancia de 300 kilómetros, su proceso de limpieza, corte, cizallado, compactado, hasta la obtención de la chatarra ferrosa clasificada por tipos (A, B y C), que posteriormente será utilizada para el proceso de acería.

Tabla 11. Resultados de Caracterización de la Fase de Preparación de Chatarra en base a 1 tonelada de chatarra reciclada

Categoría de impacto	Unidad del indicador	Total
Agotamiento abiótico	Kg Sb eq	2,87E-07
Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)	MJ	40,54
Cambio climático	Kg CO ₂ eq	47,55
Agotamiento de la capa de ozono	Kg CFC-11 eq	9,52E-06
Formación de oxidantes fotoquímicos	Kg C ₂ H ₄ eq	0,002
Acidificación	Kg SO ₂ eq	0,30
Eutrofización	Kg PO ₄ eq	0,06

Fuente: SimaPro CML-2002 versión 3.2.

Elaboración: Autor.

La figura 12 representa las contribuciones de los procesos necesarios para la obtención de 1 tonelada de chatarra clasificada para procesamiento en acería, actividades que están representadas por el transporte de chatarra a una planta ubicada en la ciudad de Guayaquil, uso de diésel de equipos que manipulan la chatarra en patio de procesamiento, empleo de gas propano y oxígeno para operaciones de oxicorte, utilización de electricidad durante el proceso, y los desechos que se generan a lo largo de esta fase, que son llevados al Relleno Sanitario Las Iguanas para su disposición final.

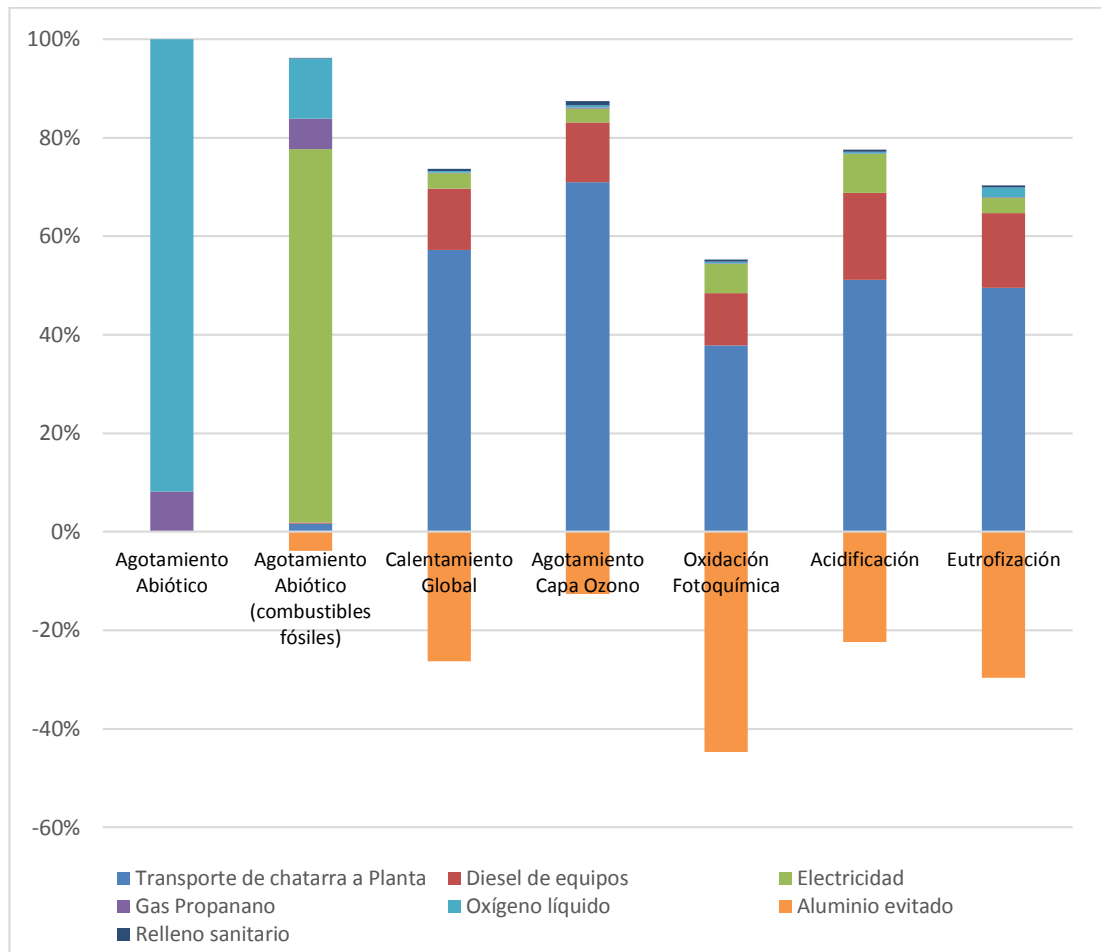


Figura 12. Resultados de Caracterización de la Fase de Chatarra Clasificada.

Fuente y Elaboración: Autor.

De las categorías observadas en la figura 12, el consumo de oxígeno aporta el 92% del total del impacto por agotamiento abiótico, la electricidad representa el 79% del impacto por agotamiento abiótico por el uso de combustibles fósiles. Sobre el total de impactos en las categorías analizadas, el transporte de chatarra hasta una planta ubicada en la ciudad de Guayaquil, recorriendo 300 kilómetros de distancia, aporta cerca del 78% al calentamiento global, el 81% al agotamiento de la capa de ozono, alrededor del 69% a la oxidación fotoquímica, 66% a la acidificación y 70% a la categoría eutrofización.

El consumo de diésel de equipos que manipulan la chatarra para procesamiento, aporta el 17% al calentamiento global, 14% al agotamiento de la capa de ozono, 19%

a oxidación fotoquímica, 23% a la acidificación y 22% a la eutrofización, y en menor porcentaje a las categorías agotamiento abiótico y agotamiento abiótico por combustibles fósiles.

Como se mencionó en la tabla 3 del capítulo 4 del presente estudio así como en la descripción de dicha tabla, los materiales no ferrosos entre los que destaca el aluminio, es considerado un desecho del proceso de obtención de chatarra clasificada, que es destinado a la venta a empresas que lo utilizan como materia prima para sus procesos. Por esta razón el “aluminio evitado” en la figura 12 está representado por un valor negativo en la evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV), porque al ser un material no ferroso que no es útil para el proceso, se lo está reciclando y entregando a empresas que sí lo requieren, y de esta manera se reemplaza la extracción primaria de este metal; es decir que se evita la extracción de recursos de la tierra.

5.2.2.2. Resultados de caracterización de la Fase de Palanquilla SAE 1029.

La tabla 12 representa los resultados de caracterización de la etapa de obtención de palanquilla SAE 1029, a partir de chatarra clasificada. Esta fase contempla actividades de transporte de chatarra ferrosa clasificada desde del patio de chatarra hasta la nave de acería, donde se ha considerado una distancia de 400 metros. Incluye además actividades de fundición de la chatarra -clasificada y dosificada- en un horno de arco eléctrico, uso de agregados de insumos, fundentes y ferroaleaciones para el ajuste de la colada, hasta obtener palanquilla SAE 1029 en la máquina de colada continua. El proceso contempla el consumo de energía de todo este proceso, el uso de agua tratada para el enfriamiento de las paredes del horno de arco eléctrico, y los desechos generados (no peligrosos y peligrosos).

Tabla 12. Resultados de Caracterización de la Fase de Obtención de Palanquilla SAE 1029 en base a 1 tonelada de palanquilla

Categoría de impacto	Unidad del indicador	Total
Agotamiento abiótico	Kg Sb eq	2,01E-05
Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)	MJ	3736,97
Cambio climático	Kg CO ₂ eq	512,47
Agotamiento de la capa de ozono	Kg CFC-11 eq	4,44E-05
Formación de oxidantes fotoquímicos	Kg C ₂ H ₄ eq	0,19
Acidificación	Kg SO ₂ eq	4,91
Eutrofización	Kg PO ₄ eq	0,63

Fuente: SimaPro CML-2002 versión 3.2

Elaboración: Autor.

La figura 13 representa la contribución a las categorías de impacto por el proceso de obtención de palanquilla SAE 1029, a partir de chatarra clasificada, donde se puede observar que la electricidad tiene mayor incidencia en las categorías agotamiento abiótico por combustibles fósiles, calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, oxidación fotoquímica, acidificación y eutrofización; y esto se debe a que para obtener palanquilla SAE 1029 se realiza procesos de fundición de chatarra clasificada, mediante el empleo del horno de arco eléctrico, que representa un consumo de energía eléctrica alto en esta etapa. Adicionalmente se realizan ajustes a la colada mediante la incorporación de ferroaleaciones en un horno cuchara, para finalmente en la máquina de colada continua obtener palanquilla que será utilizada en el proceso final que comprende la laminación en caliente para formar la varilla.

En la categoría agotamiento abiótico el carburo de calcio aporta el 39% del total, y el 22% los aceites lubricantes utilizados en el área de acería. En la categoría agotamiento abiótico por combustibles fósiles, la electricidad representó el 66% del total, seguido por la antracita con una aportación del 16,6%. Para las categorías calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, oxidación fotoquímica, acidificación y eutrofización, la electricidad representó el 46%, 60%, 54%, 64% y 54% respectivamente.

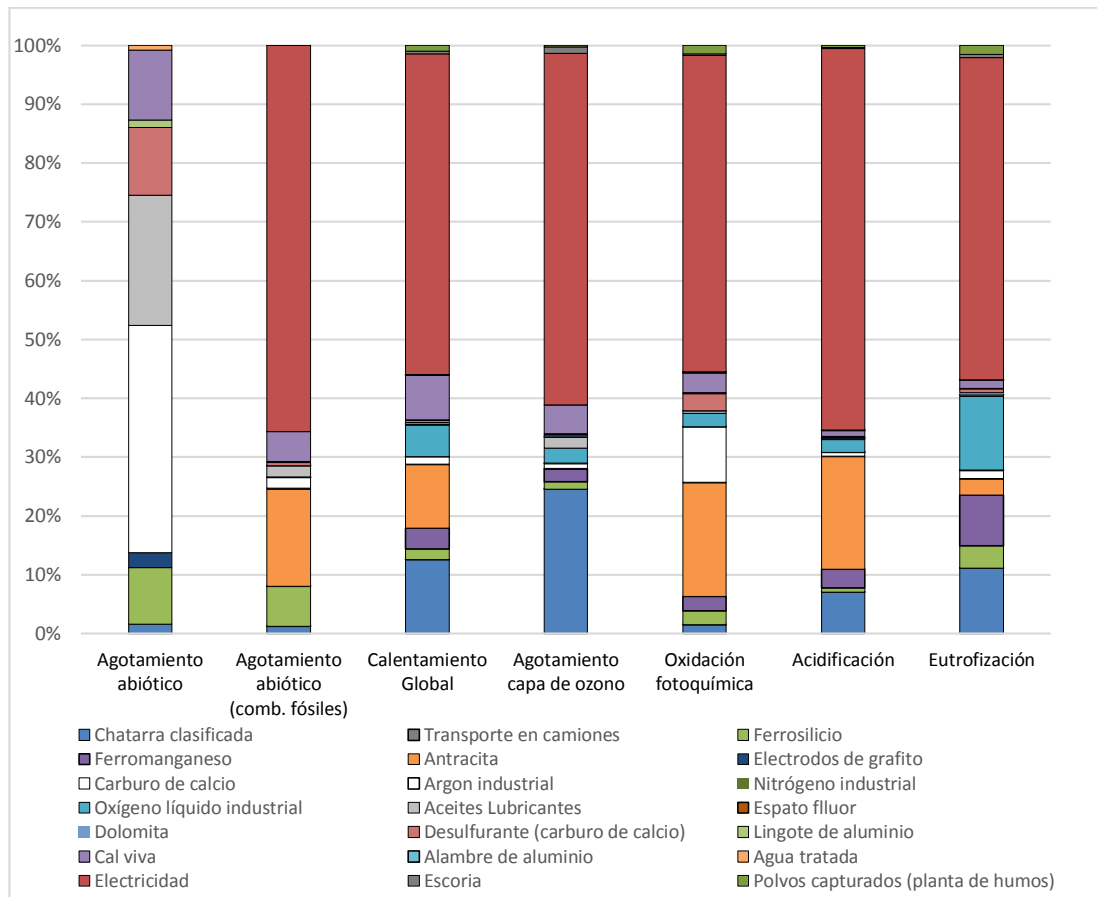


Figura 13. Resultados de Caracterización de la Fase de Obtención de Palanquilla SAE 1029

Fuente y Elaboración: Autor.

5.2.2.3. Resultados de caracterización la Fase de Obtención de Varilla de Acero SAE 1029.

La tabla 13 muestra los resultados de las categorías de impacto para la Fase de Preparación de Chatarra, que están representados por los impactos ambientales provocados por el transporte de la palanquilla SAE 1029 desde el área de almacenamiento, considerando una distancia de 70 metros. El transporte es realizado por montacargas a diésel, el consumo de búnker en el horno de precalentamiento de la palanquilla y el proceso de laminación en caliente hasta la obtención de la varilla de acero SAE 1029.

**Tabla 13. Resultados de Caracterización de la Fase de Obtención
de Varilla SAE 1029 en base a 1 tonelada de varilla**

Categoría de impacto	Unidad del indicador	Total
Agotamiento abiótico	Kg Sb eq	2,18E-05
Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)	MJ	4424,38
Cambio climático	Kg CO ₂ eq	713,54
Agotamiento de la capa de ozono	Kg CFC-11 eq	7,68E-05
Formación de oxidantes fotoquímicos	Kg C ₂ H ₄ eq	0,25
Acidificación	Kg SO ₂ eq	6,58
Eutrofización	Kg PO ₄ eq	0,76

Fuente: SimaPro CML-2002 versión 3.2

Elaboración: Autor.

En la figura 14 se observa que la palanquilla aporta en todas las categorías de impacto estudiadas. Está representada por el proceso anterior como la mayor aportación en esta fase, es decir la de obtención de palanquilla SAE 1029 que es producida en el proceso de acería, y que es la entrada de la etapa de fabricación de varilla de acero.

La producción de palanquilla SAE 1029 aporta el 95,4% en la categoría agotamiento abiótico, 87% en la categoría agotamiento abiótico por combustibles fósiles, en calentamiento global contribuye el 74,3%, en agotamiento de la capa de ozono el 60%, en las categorías oxidación fotoquímica y acidificación el 77% cada una, y en eutrofización el 85%.

El búnker utilizado por el horno de laminación en caliente, para el precalentamiento de palanquilla, aporta a las categorías de impacto agotamiento de la capa de ozono (32,3%), calentamiento global (18,4%), oxidación fotoquímica (13,8%), acidificación (12,1%), eutrofización (4,9%), por el uso de combustibles fósiles.

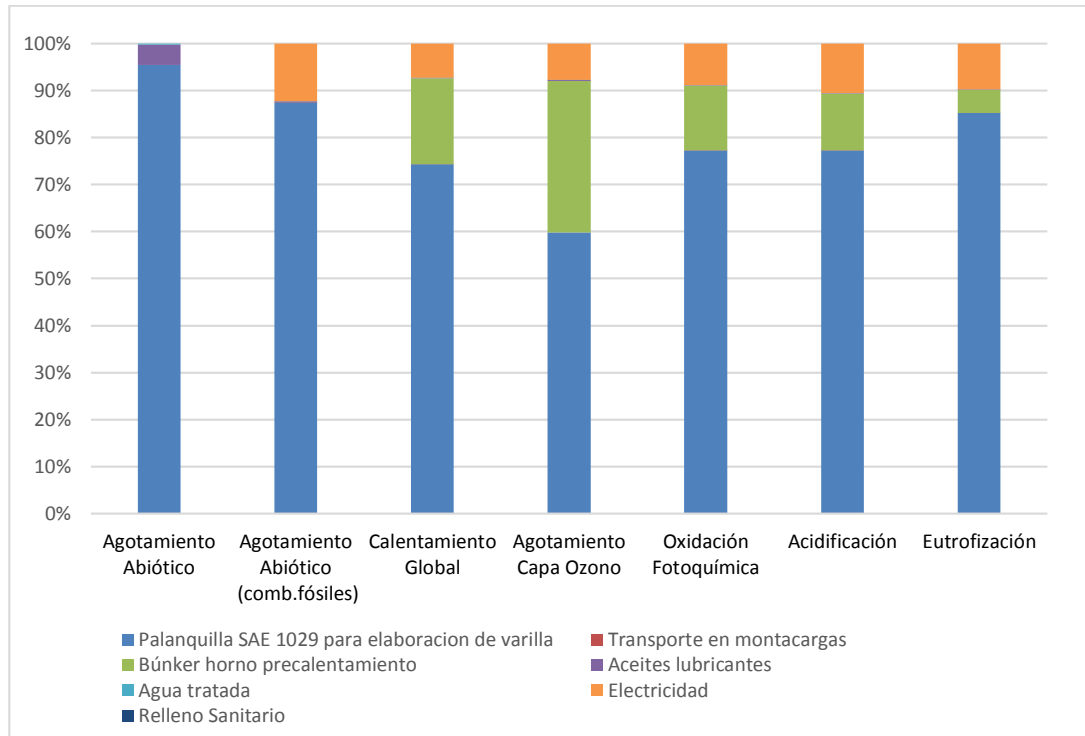


Figura 14. Resultados de Caracterización de la Fase de Obtención de Varilla SAE 1029

Fuente y Elaboración: Autor.

5.2.3. Análisis de contribución por indicador de impacto

5.2.3.1. Agotamiento Abiótico

La figura 15 representa la contribución por agotamiento abiótico, donde entre el 13% y 16% lo aportan el zinc, cobre y oro, que son parte del proceso de fabricación de carburo de calcio, que a su vez es parte de los insumos para el proceso de obtención de palanquilla SAE 1029.

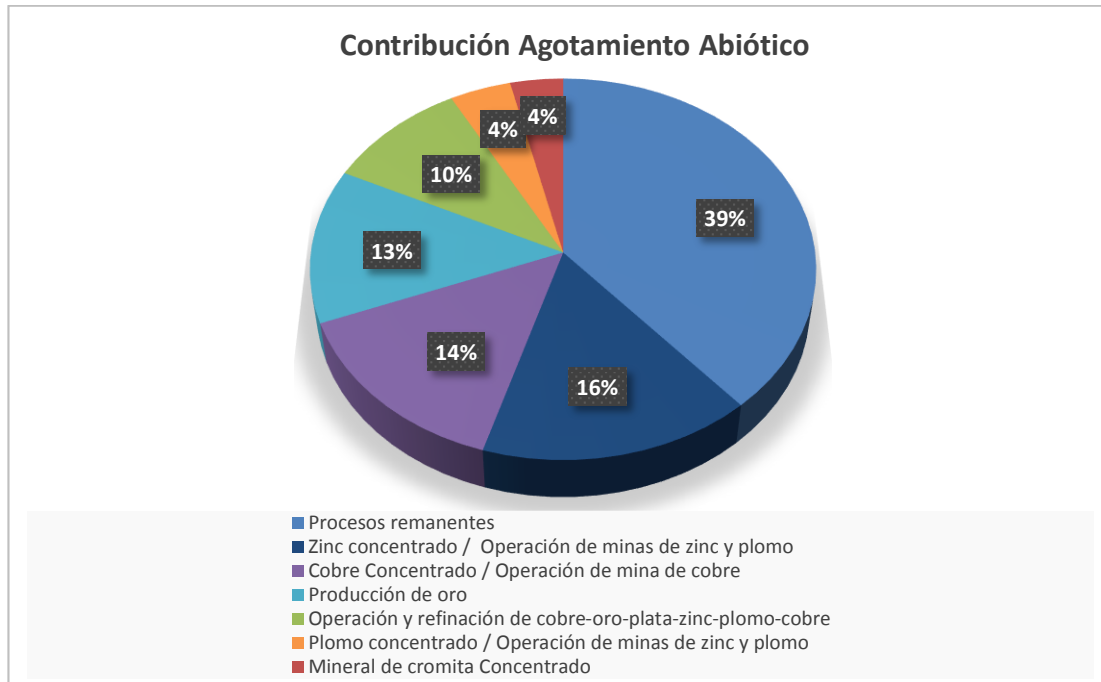


Figura 15. Contribución Agotamiento Abiótico

Fuente y Elaboración: Autor.

5.2.3.2. Agotamiento Abiótico por Combustibles Fósiles

La figura 16 representa el 71% del consumo de electricidad que impacta de manera directa a la categoría agotamiento abiótico por combustibles fósiles, y se da principalmente por el proceso de elaboración de palanquilla SAE 1029 en el área de fundición, donde el 66% se atribuye al consumo de energía eléctrica, el 17% a la antracita (mineral de carbón), 5% lo representa la cal viva, y en menores proporciones los aceites lubricantes, carburo de calcio, y otros.

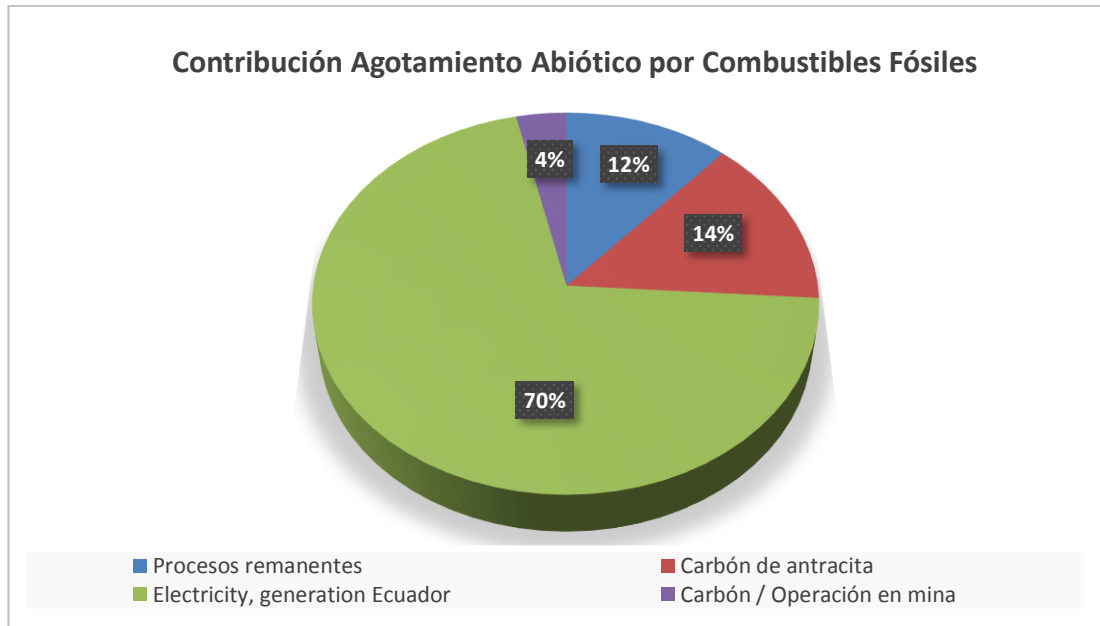


Figura 16. Contribución Agotamiento Abiótico por Combustibles Fósiles

Fuente y Elaboración: Autor.

La generación de electricidad depende de la fuente de energía primaria utilizada, del tipo de tecnología utilizado, del entorno del emplazamiento de la instalación, y conlleva una serie de contaminantes. En el caso de la generación de energía eléctrica en centrales térmicas, se requiere la quema de combustibles fósiles como carbón, búnker, que generan cenizas y emisiones de contaminantes al aire como dióxido de carbono (CO_2), óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x), además generan un cambio térmico en el agua que se utiliza para refrigeración.

5.2.3.3. Calentamiento Global

En la figura 17 se muestra el análisis de contribución para “calentamiento global”, de los procesos de fabricación de varilla de acero SAE 1029 que inciden en esta categoría, donde la mayor aportación se atribuye al consumo de energía eléctrica, con un porcentaje de contribución del 30%, la misma que proviene del proceso de obtención de palanquilla SAE 1029 que representa el 74,3% del total de contribución a la categoría analizada. El 18,4% proviene del consumo de búnker utilizado en el horno de precalentamiento de palanquilla, que se da en el proceso de laminación en caliente.

El impacto a la categoría calentamiento global se debe principalmente a las altas emisiones de CO₂ para la generación de electricidad que se produce desde centrales termoeléctricas, y es uno de los gases que aporta el efecto invernadero.

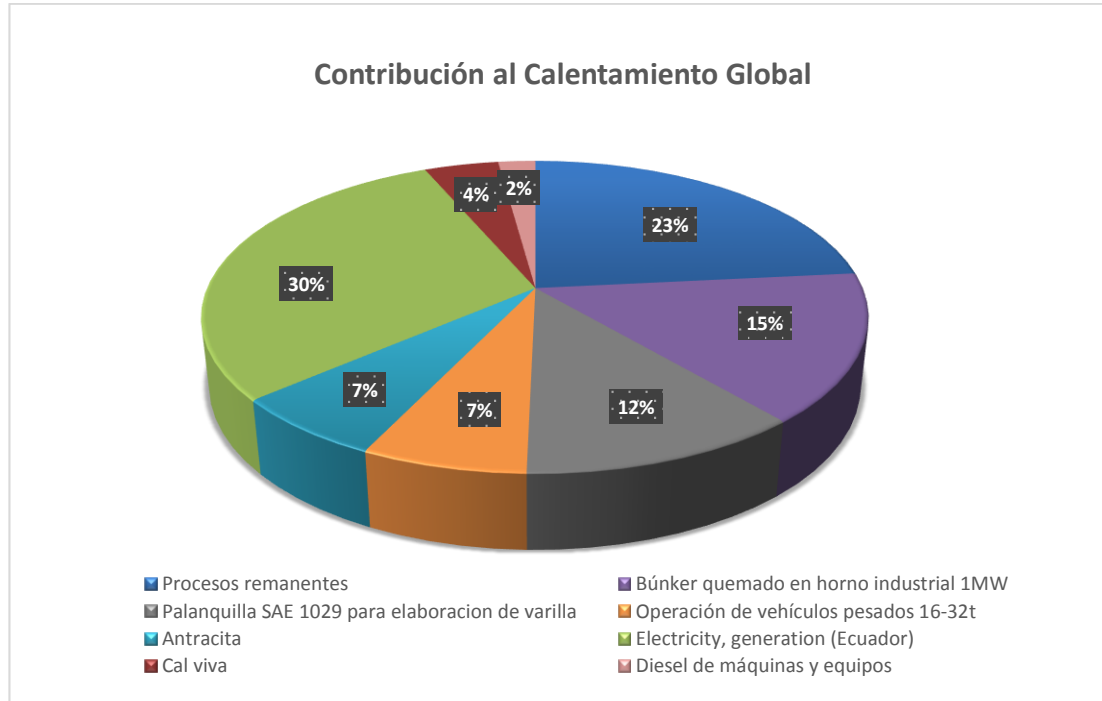


Figura 17. Contribución Calentamiento Global

Fuente y Elaboración: Autor.

El consumo principal de energía eléctrica se da en el proceso de obtención de palanquilla a partir de chatarra clasificada, es decir en el área de Acería, donde se utiliza para la fundición un horno de arco eléctrico, siendo el que mayor consumo de energía demanda, representado por el 67% del total de acería, seguido por el horno de afino donde se realiza el ajuste de la colada que consume el 10% del total, los servicios auxiliares aportan el 9% (grúas, sistema consteel, planta de agua, etc.), la planta de humos el 8% y la máquina de colada continua el 5% restante, como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14. Consumo de energía eléctrica de la Fase de Obtención de Palanquilla SAE 1029

	Kwh	% consumo
Horno de Arco Eléctrico	70.167.450,72	67%
Horno de Afino	10.965.806,45	10%
Colada Continua	5.673.181,28	5%
Planta de Humos	8.923.914,15	8%
Servicios Auxiliares	9.618.473,76	9%
Total Energía Eléctrica	105.348.826,36	100%

Fuente: Datos proporcionados por una empresa de Guayaquil.

Elaboración: Autor.

5.2.3.4. Agotamiento de la Capa de Ozono

Como se observa en la figura 18, en la categoría agotamiento de la capa de ozono, el 89% del total está representado por la producción de crudo, provenientes del refinado del petróleo. En el caso de los aceites, lubricantes y grasas, estos son utilizados para el proceso de fabricación de palanquilla SAE 1029, con un aporte del 84%. Para el transporte de palanquillas al área de laminación en caliente, se utiliza montacargas que usan diésel como combustibles.

Otro derivado del petróleo que se usa es el búnker para calentamiento del horno de palanquillas; y la energía eléctrica que se usa durante el proceso, la misma que proviene de centrales térmicas que utilizan combustibles fósiles para generar electricidad.

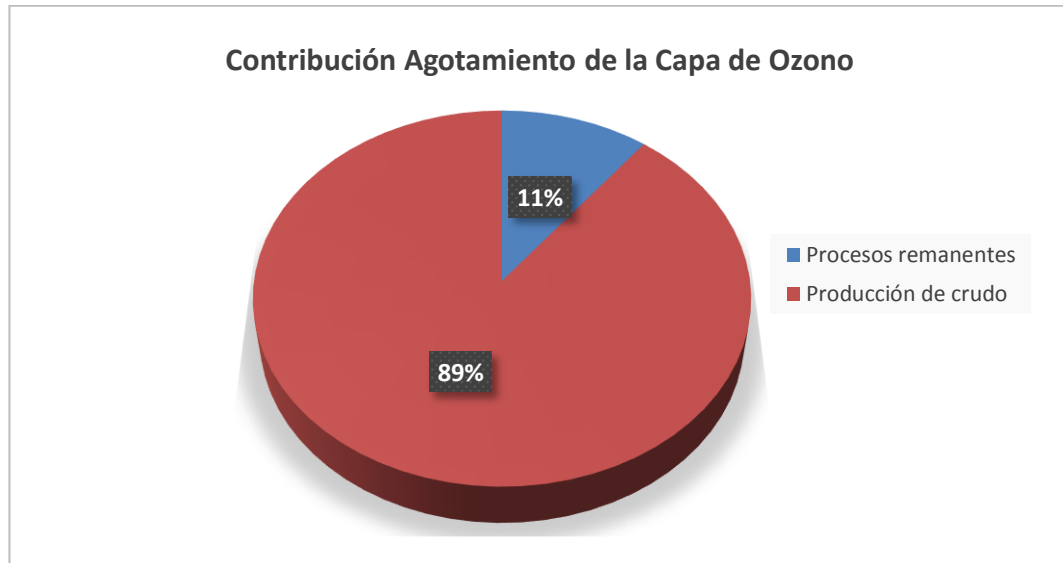


Figura 18. Contribución Agotamiento de la Capa de Ozono

Fuente y Elaboración: Autor.

Los clorofluorocarbonos (CFC's) son derivados de los hidrocarburos saturados que se obtienen mediante la sustitución de átomos de hidrógeno por átomos de flúor y cloro. Existen también hidrocarburos que contienen sustancias bromadas y cloradas, que son las aportantes al agotamiento de la capa de ozono.

5.2.3.5. Oxidación Fotoquímica

La figura 19 representa la contribución a la categoría oxidación fotoquímica, atribuida principalmente a la electricidad con un aporte del 34% del total que proviene principalmente de la fabricación de palanquilla SAE 1029 , y al búnker tanto para su producción como para consumo en el horno de precalentamiento.

El uso de la electricidad y el búnker está ligado al proceso de obtención de varilla SAE 1029, y su incidencia en la oxidación fotoquímica se debe a los óxidos de nitrógeno.

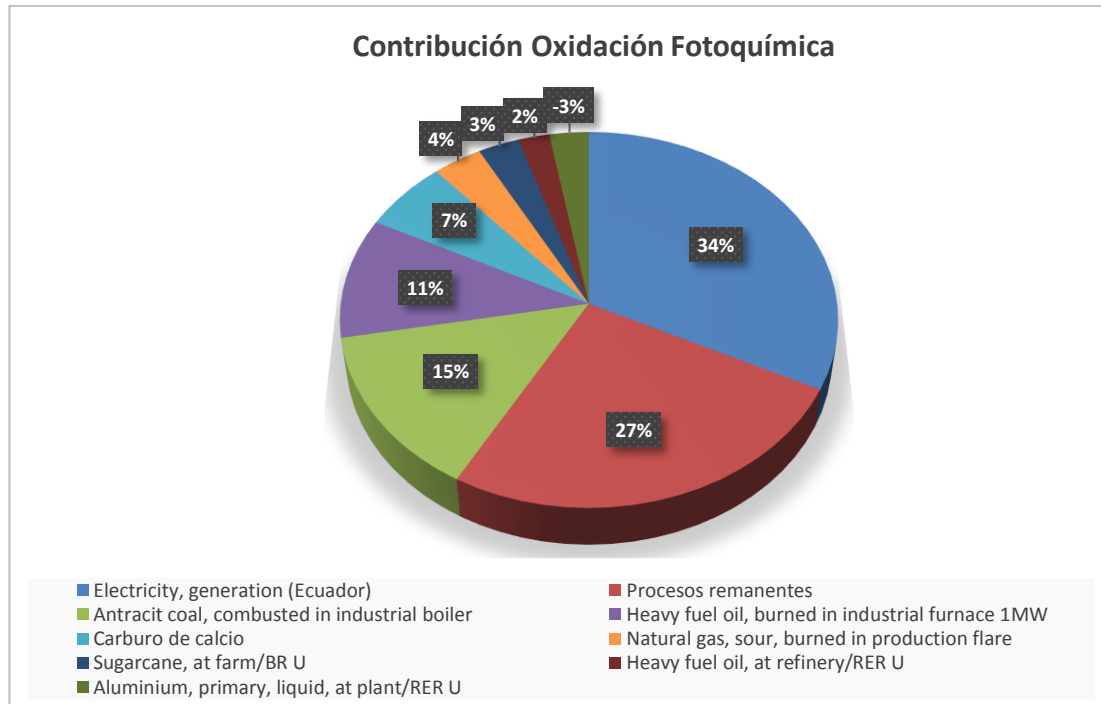


Figura 19. Contribución Oxidación Fotoquímica

Fuente y Elaboración: Autor.

De acuerdo a la investigación realizada por A. Ramírez, et al. [43], sobre análisis de ciclo de vida de la electricidad en el Ecuador, menciona el uso de combustibles fósiles para la operación de centrales térmicas de generación de energía eléctrica, y en particular la combustión, es el mayor contribuyente a los indicadores de calentamiento global, oxidación fotoquímica, acidificación, eutrofización.

5.2.3.6. Acidificación

La figura 20 muestra que el 49% de la contribución por esta categoría de impacto se atribuye a la energía eléctrica. De ese 49%, el 77,3% lo aporta el proceso de obtención de palanquilla SAE 1029 y el 12,1% el búnker utilizado en el horno de precalentamiento de palanquilla. En el Ecuador la generación de electricidad por centrales térmicas conlleva emisiones de SO_x y NO_x que son los causantes de la lluvia ácida. La combinación de óxidos con oxígeno y agua, forman ácido nítrico HNO_3 y ácido sulfúrico H_2SO_4 que cambian el pH de la lluvia, la misma que al tener contacto el agua de ríos y mares, se acidifica alterando el ecosistema.

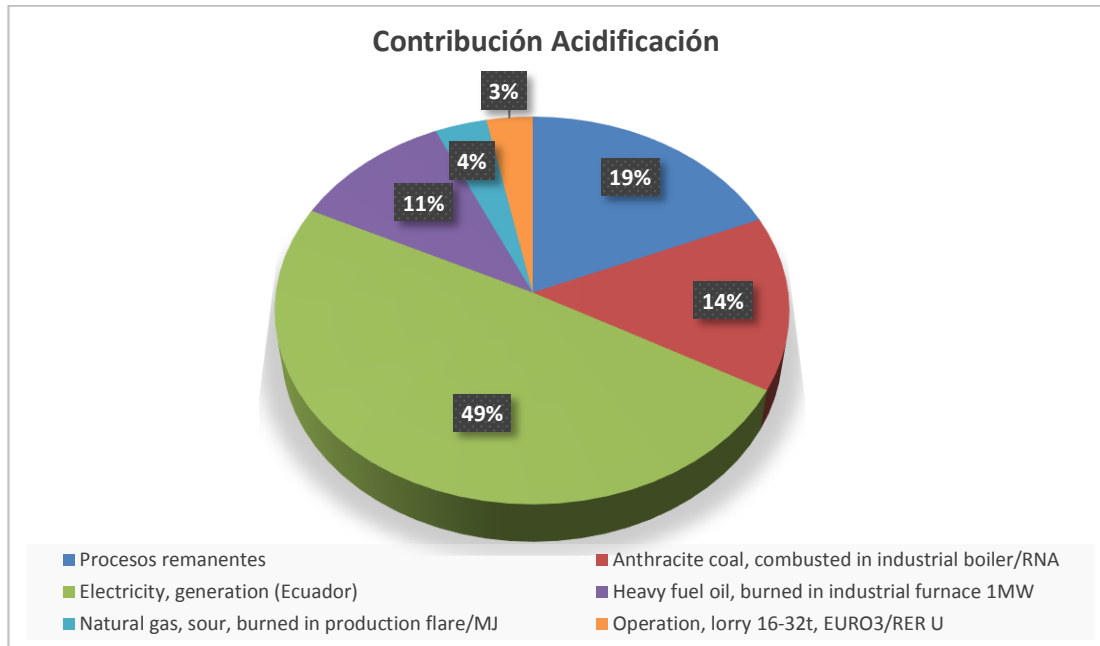


Figura 20. Contribución Acidificación

Fuente y Elaboración: Autor.

5.2.3.7. Eutrofización

La figura 21 está representada por la electricidad como la mayor contribuyente a la eutrofización, con una aportación del 38%. Seguido en importancia están los desechos generados en la minería de lignito con el 13%. El lignito es un carbón mineral que se emplea como combustible en centrales térmicas. La información de Ecoinvent utilizada para el análisis, corresponde a una base de datos de Europa.

Con base a lo indicado en el párrafo anterior, la energía eléctrica fue empleada para la producción de oxígeno líquido que se utiliza en el horno de arco eléctrico para el proceso de obtención de palanquilla SAE 1029.



Figura 21. Contribución Eutrofización

Fuente y Elaboración: Autor.

5.3. Comparación con resultados de otros estudios

La tabla 15 compara los resultados obtenidos en el presente estudio, con los de varias publicaciones científicas.

Tabla 15. Comparación de resultados para 1 tonelada de acero producido mediante tecnología de horno de arco eléctrico

Categoría de impacto	Unidad del indicador	Resultados de este estudio	Worldstell Association [19]	Burchart-Korol [21]	Das and Kandpal [22]	Hu et al. [23]	Sakamoto et al [24]
Agotamiento abiótico	Kg (Sb eq)	0,0000218					
Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)	MJ	4.424,38					
Cambio climático	Kg (CO ₂ eq)	713,54	1.600,00	913,00	1.180,00	590,00	560,00
Agotamiento de la capa de ozono	Kg CFC-11 eq	0,0000768					
Formación de oxidantes fotoquímicos	Kg (C ₂ H ₄ eq)	0,25	0,80				
Acidificación	Kg (SO ₂ eq)	6,58	4,50				
Eutrofización	Kg (PO ₄ eq)	0,76	0,36				

Fuente: Publicaciones varias.

Elaboración: Autor.

En la categoría “cambio climático”, para el análisis de ciclo de vida de la varilla de acero SAE 1029 producida en la ciudad de Guayaquil, se obtuvo como resultado 713,54 Kg (CO₂ eq). Por otra parte, un estudio de la World Steel Association [19] para ACV de productos de acero de empresas de acería que forman parte de esta asociación y que utilizan para fundición hornos de arco eléctrico, publicó como resultado de la categoría cambio climático, un valor de 1.600 Kg (CO₂ eq).

Publicaciones de Burchart-Korol [21], Das and Kandpal [22], Hu et al. [23] y Sakamoto et al. [24], obtuvieron 913 Kg (CO₂ eq), 1.180 Kg (CO₂ eq), 590 Kg (CO₂ eq) y 560 Kg (CO₂ eq) respectivamente; lo que denota que el presente estudio tiene el mismo orden de magnitud, considerando que las publicaciones con las que se comparó el estudio, tomaron como unidad funcional 1 tonelada de producto de acero producido y utilizaron hornos de arco eléctrico. Para el caso de worldsteel, los datos reportados se basaron en 1 kg de producto de acero producido a base de chatarra; pero para efectos de comparación se realizó el cálculo para llevar la unidad funcional a 1 tonelada de producto.

Las posibles razones de la diferencia en la comparación de resultados son por una parte la metodología de cálculo utilizada, y la otra es que la matriz energética del país tiene un rol fundamental en el desempeño ambiental de la electricidad; y es diferente (en ocasiones en gran medida) para cada país.

En la categoría “oxidación fotoquímica”, el resultado de este estudio fue 0,25 Kg (C₂H₄ eq) y el de WSA 0,80 Kg (C₂H₄ eq). Para “acidificación”, se obtuvo un resultado de 6,58 Kg (SO₂ eq), mientras que el de WSA fue 4,50 Kg (SO₂ eq). Finalmente para la categoría “eutrofización”, en este estudio se obtuvo un valor de 0,76 Kg (PO₄ eq) y la WSA 0,36 Kg (PO₄ eq).

CAPÍTULO VI.

6. CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- En el análisis de resultados de caracterización de las tres fases estudiadas, se determinó que la etapa de obtención de palanquilla a partir de chatarra clasificada, operación que se realiza en el área de acería, es la mayor contribuyente al impacto ambiental en todas las categorías estudiadas, cuyas aportaciones están entre el 45% y 94%.

La contribución está representada por el indicador agotamiento abiótico (93,9%), agotamiento abiótico por combustibles fósiles (86,3%), oxidación fotoquímica (76,1%), eutrofización (76,0%) y acidificación (71,9%). Las aportaciones a las categorías calentamiento global y agotamiento de la capa de ozono representaron el 66,4% y 45,1% respectivamente.

- Las contribuciones del proceso de obtención de palanquilla se deben principalmente al consumo de energía eléctrica, que incide en la mayoría de las categorías de impacto analizadas, con una aportación del 51,4% al calentamiento global, 54,6% a la formación de oxidantes fotoquímicos, 60% a la eutrofización, 66,5% al agotamiento abiótico por combustibles fósiles, 68,9% a la acidificación y 79,2% al agotamiento de la capa de ozono. Estos resultados concuerdan por el alto consumo de energía eléctrica que se requiere principalmente para fundición de chatarra clasificada y dosificada, que se realiza en el horno de arco eléctrico, cuyo consumo representa el 67% del total del área de acería.

- La etapa de obtención de chatarra clasificada que se realiza en el patio de procesamiento, es la que tiene menor contribución en todas las categorías de impacto analizadas, aportando el 14,7% del total, al agotamiento de la capa de ozono, eutrofización (9,3%) y calentamiento global (7,9%). El resto de categorías tienen una menor contribución y están entre el 1,1% y 5,4%.
- En la fase de obtención de varilla SAE 1029 a partir de palanquilla, proceso que se realiza en el área de laminación en caliente, las contribuciones estuvieron representadas por las categorías agotamiento de la capa de ozono con una aportación del 40,2%, calentamiento global (25,7%), oxidación fotoquímica (22,8%), acidificación (22,7%), eutrofización (14,7%), agotamiento abiótico por combustibles fósiles (12,6%) y agotamiento abiótico (4,6%).
- Para la categoría calentamiento global, el 30% de la contribución estuvo representada por la electricidad, el 15% por búnker utilizado en el horno de precalentamiento de palanquilla previo a laminación, el 12% a la emisión de dióxido de carbono asociado a la fundición de chatarra durante la producción de palanquilla SAE 1029, el 7% a la operación de los vehículos que transportan la chatarra recorriendo una distancia de 300 kilómetros hasta la Planta, y el 7% al consumo de antracita.
- El consumo de energía asociado al horno de arco eléctrico aporta el 67% del total de la energía de acería; energía que se requiere para fundir chatarra y obtener acero líquido. El 10% del consumo total de electricidad para el horno de afino, servicios auxiliares el 9%, planta de humos 8% y colada continua 5%.

La energía eléctrica utilizada proviene de centrales térmicas que requieren el consumo de combustibles fósiles para su generación, energía que contribuye

al calentamiento global por efecto de gases de efecto invernadero que provocan la lluvia ácida.

El consumo de energía eléctrica de toda la Planta está distribuido de la siguiente manera: 1% se destina al área de procesamiento y clasificación de chatarra, 83% a fundición (acería) donde se obtiene palanquilla, y el 16% al proceso de laminación en caliente, donde se fabrica varilla.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gerdau Aza, «Compendio de Normas para Productos de Acero». Tercera Edición, 2000.
- [2] W. World Steel Association, «Membership Benefits». 2016.
- [3] World Steel Association, «Steel Statistical Yearbook 2015». worldsteel Committee on Economic Studies – Brussels, 2015.
- [4] I. Servicio Ecuatoriano de Normalización, «Gestión Ambiental - Análisis del Ciclo de Vida - Principios y Marco de Referencia (ISO 14040:2006, IDT)». ISO 2006 - Todos los derechos reservados, 2014.
- [5] W. S. A. Worldsteel, «Steel's Contribution to a Low Carbon Future and Climate Resilient Societies. Worldsteel Position Paper». Worldsteel Association, 2015.
- [6] W. A. WSA, «Sustainable Steel. Policy and Indicators 2015». World Steel Association, 2015.
- [7] H. Baumann y Tillman Anne-Marie, *The Hitch Hiker's Guide to LCA: An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application*. Sweden: Studentlitteratur AB (March 12, 2004).
- [8] G. Rebitzer *et al.*, «Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications», *Environ. Int.*, vol. 30, n.º 5, pp. 701-720, jul. 2004.
- [9] G. H. Cadavid Marín, «Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del Proceso Siderúrgico», Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2014.
- [10] M. Wendell, M. D. Lagrega, P. L. Buckingham, y J. C. Evans, *Análisis del Ciclo de Vida*. España: McGraw Hill / Iberoamericana.
- [11] V. Hoof, N. Monroy, y A. Saer, «La Herramienta de Análisis de Ciclo de Vida. Producción Más Limpia. Paradigma de Gestión Ambiental». Editorial Alfaomega Colombiana S.A., 2008.
- [12] I. S. ISO, «International Standard ISO 14040. Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework. Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre». SAI Global, 2006.

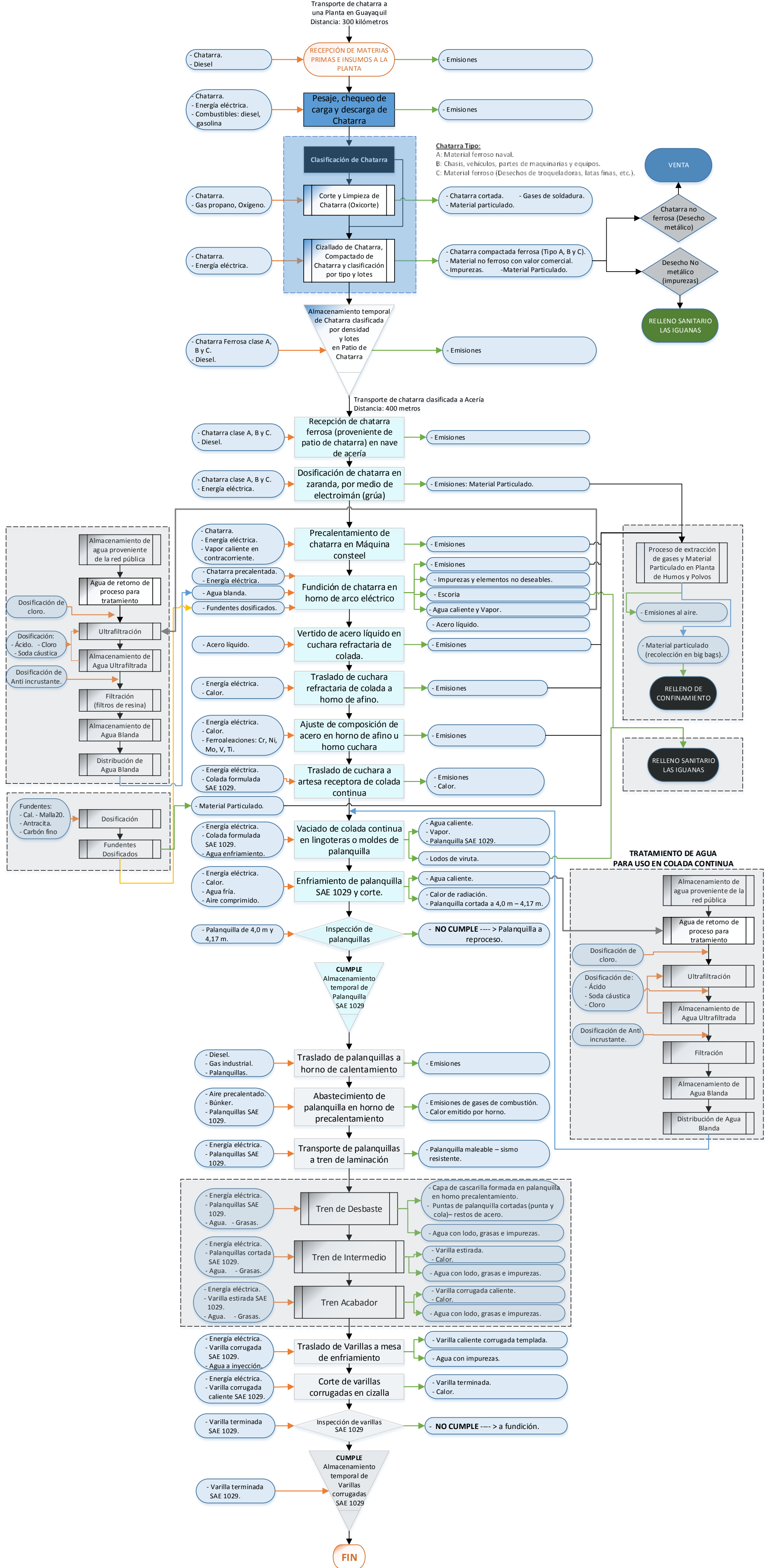
- [13] Standard Irish, «National Standards Authority of Ireland. IRISH STANDARD. I.S.EN ISO 14044:2006. Environmental Management — Life Cycle Assessment — Requirements and Guidelines. European Committee for Standardization, First edition (2006-07-01), pp. 1-45.» 01-jul-2006.
- [14] S. of E. T. and C. SETAC, «Guidelines for Life-cycle Assessment: “A Code of Practice”.» SETAC, Brussels, 31-abr-1993.
- [15] A. Aranda U., I. Zabalza B., A. Martínez G., A. Valero D., y S. Scarpellini, «El Análisis del Ciclo de Vida como Herramienta de Gestión Empresarial», en *El Análisis del Ciclo de Vida como Herramienta de Gestión Empresarial*, FC Editorial Fundación Confemetal, p. 67.
- [16] F. J. Uche Marcelo, «La energía en el Agua», en *La energía en el Agua*, Primera., Prensa de la Universidad de Zaragoza: Editorial miembro de la UNE, 2013, p. 124.
- [17] S. Schaltegger, *Life Cycle Assessment (LCA) — Quo vadis?* Berlin: Springer Science & Business Media, 1996.
- [18] J. Guinée, R. Heijungs, A. Zamagni, P. Masoni, y R. Buonamici, *Life Cycle Assessment: Past, Present and Future*, vol. 45, 1 vols. Environmental Science & Technology, 2011.
- [19] W. S. A. WSA, *Life Cycle Assessment Methodology Report. Life cycle inventory study for steel products*. Worldsteel, 2011.
- [20] G. Yifan *et al.*, «Calculation of water footprint of the iron and steel industry: a case study in Eastern China», *ScienceDirect*, vol. 92, pp. 274-281, 2015.
- [21] D. Burchart-Korol, «Life cycle assessment of steel production in Poland: a case study», *SciVerse Sci.*, vol. 54, pp. 235-243, 2013.
- [22] A. Das y T. C. Kandpal, «Iron and steel manufacturing technologies in India: estimation of CO2 emission», *Int. J. Energy Res.*, vol. 21, n.º 12, pp. 1187-1201, oct. 1997.
- [23] C. HU, L. CHEN, C. ZHANG, Y. QI, y R. YIN, «Emission Mitigation of CO2 in Steel Industry: Current Status and Future Scenarios», *J. Iron Steel Res. Int.*, vol. 13, n.º 6, pp. 38-52, nov. 2006.

- [24] Y. Sakamoto, Y. Tonooka, y Y. Yanagisawa, «Estimation of energy consumption for each process in the Japanese steel industry: a process analysis», *Energy Convers. Manag.*, vol. 40, n.º 11, pp. 1129-1140, jul. 1999.
- [25] G. M. Olmez, F. B. Dilek, T. Karanfil, y U. Yetis, «The environmental impacts of iron and steel industry: a life cycle assessment study», *J. Clean. Prod.*, vol. 130, pp. 195-201, sep. 2016.
- [26] S. M. M. Rahman, R. M. Handler, y A. L. Mayer, «Life cycle assessment of steel in the ship recycling industry in Bangladesh», *J. Clean. Prod.*, vol. 135, pp. 963-971, nov. 2016.
- [27] S. E. de N. INEN, «Norma Técnica Ecuatoriana NTE-INEN 2167. Varillas de Acero con Resaltes, Laminadas en Caliente, Soldables, Microaleadas o Termotratadas, para Hormigón Armado. Requisitos». NTE-INEN 2167, 2015.
- [28] I. E. D. N. INEN, «NTE INEN 102:2003 Varillas con Resaltes de Acero al Carbono Laminadas en Caliente para Hormigón Armado. Requisitos. Tercera revisión». 2003.
- [29] I. E. D. N. INEN, «NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2505: Chatarra metálica ferrosa. Acopio. Requisitos». INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, 2010.
- [30] M. Marozzi y M. Guzzon, «The evolution of preheating and the importance of the hot heel in supersized EAF systems.» MPT-Metallurgical Plant and Technology, 2011.
- [31] E. B. Inc, «esquema.gif (600×300)», 1999. [En línea]. Disponible en: http://www.imh.eus/prototipos/GSB_v4/01/A_1cc/a1cc/esquema.gif. [Accedido: 09-feb-2017].
- [32] U. S. E. P. A. EPA, «Air Emissions Factors and Quantification. AP-42: Compilation of Air Emission Factors.» Environmental Protection Agency.
- [33] J. Madías, «El impacto de las recientes innovaciones en los hornos eléctricos de arco.» Metallon, Argentina, abr-2013.
- [34] Jose Tejada Arreaga, «Barras de Refuerzo para la Construcción», 19:56:07 UTC.

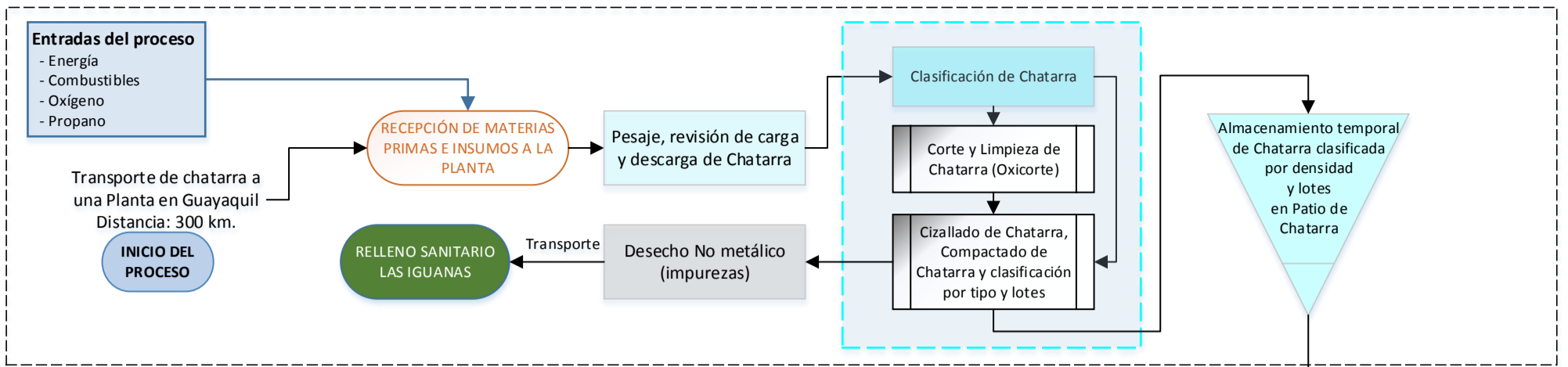
- [35] «hornos industriales expo.pptx», *emaze presentations*. [En línea]. Disponible en: <https://www.emaze.com/@ALZCLLRT>. [Accedido: 09-feb-2017].
- [36] «The world's most consistent and transparent Life Cycle Inventory database. Introduction to the ecoinvent version 3.1 database». Ecoinvent, 30-ago-2015.
- [37] IPCC, «IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 4: Metal Industry Emissions.».
- [38] «SimaPro LCI Databases - ELCD», *SimaPro*. [En línea]. Disponible en: <https://simapro.com/databases/elcd/>. [Accedido: 09-feb-2017].
- [39] K. Crespo L., «Análisis de Ciclo de Vida de una Vivienda de Tipo Media en la Ciudad de Guayaquil. Previo a la obtención del título de Magister en Ciencias Ambientales», Espol, Guayaquil - Ecuador, 2016.
- [40] P. Karka, S. Papadokonstantakis, y A. Kokossis, «Cradle-to-gate assessment of environmental impacts for a broad set of biomass-to-product process chains», *Int. J. Life Cycle Assess.*, pp. 1-23, feb. 2017.
- [41] SETAC, W. 2001, y C. 2002, «Life Cycle Assessment - Methodology».
- [42] H. K. Stranddorf, L. Hoffmann, y A. Schmidt, «LCA technical report: Impact categories, normalisation and weighting in LCA», FORCE Technology/dk-TEKNIK, p. 292.
- [43] A. Ramírez, A. M. Melendres, y S. Espinoza, «Life cycle assessment of Ecuadorian electricity», presentado en VI Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica, Lima, Perú, 2015.

ANEXOS

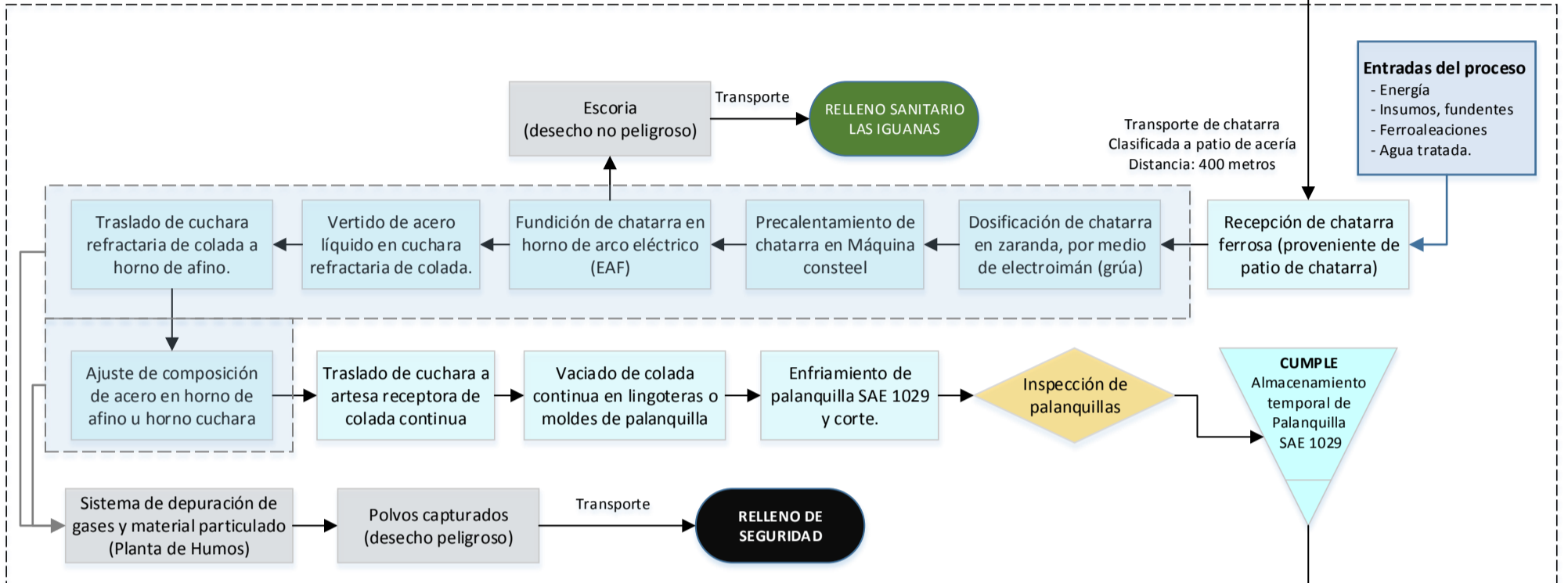
1. Diagrama de flujo del Proceso de fabricación de Varilla SAE 1029



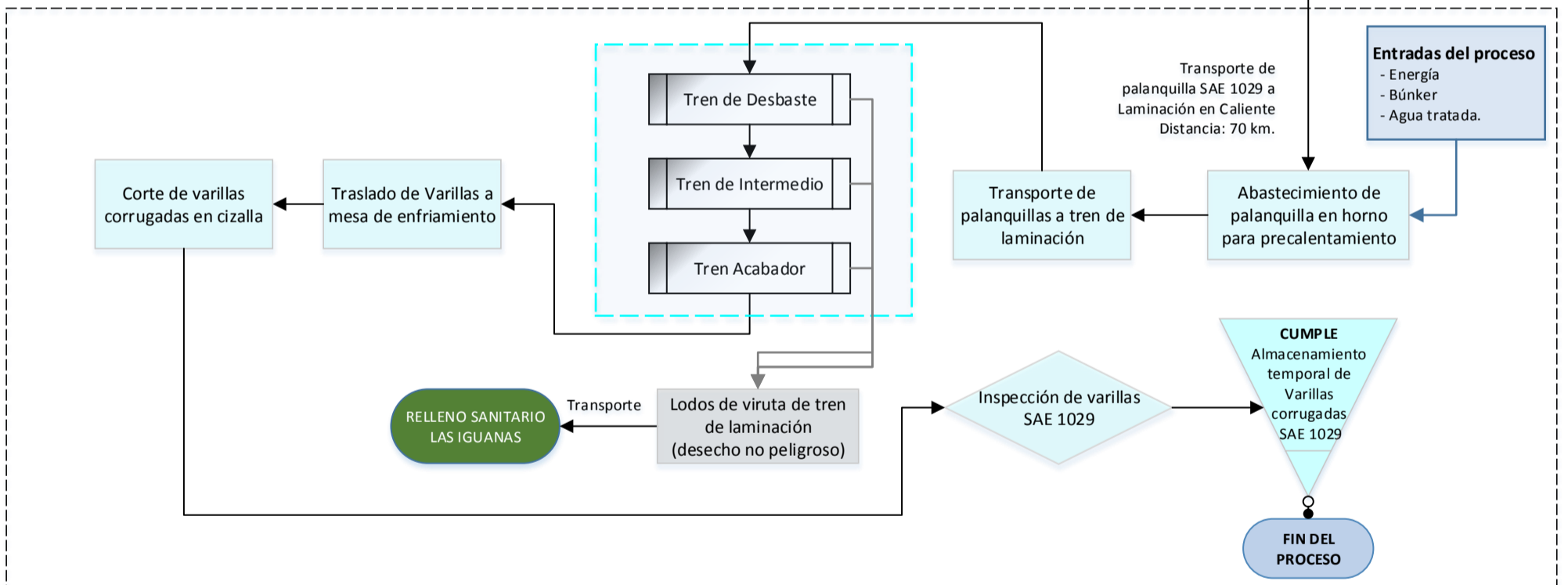
FASE DE CLASIFICACIÓN DE CHATARRA



FASE DE OBTENCIÓN DE PALANQUILLA SAE 1029



FASE DE OBTENCIÓN DE VARILLA SAE 1029



2. Caracterización Chatarra Clasificada

SimaPro 8.0.4.30
 Proyecto

Análisis de impacto Fecha:
 Electricity Ecuador

04/02/2017 Período: 12:01

Calculation: Analizar
 Results: Evaluación del impacto
 Product: 1 ton Chatarra clasificada (of project Electricity Ecuador)
 Método: CML-IA baseline V3.02 / EU25
 Indicador: Caracterización
 Skip categories: Nunca
 Excluir procesos de infraestructura: N°
 Excluir emisiones a largo plazo: N°
 Sorted on item: Categoría de impacto
 Sort order: Ascendente

Categoría de impacto	Unidad	Total	Chatarra clasificada	Transport, lorr Diesel, burnec	Electricity, at sPropane {GLO}] market f	Oxygen, liquid i	Aluminium, primary, i	Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U
Abiotic depletion	kg Sb eq	2,8672E-07	0	0	0	2,34109E-08	2,63304E-07	0
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	40,5389504	0	0,71884283	0,08724186	33,3741246	2,708134703	5,358879854
Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	47,5505612	0	57,3960464	12,4061628	3,20701449	0,042907091	0,424631196
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	9,5213E-06	0	9,029E-06	1,546E-06	3,6106E-07	3,2043E-08	5,06781E-08
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	0,00240557	0	0,0086708	0,00244225	0,00135426	2,32068E-05	8,25414E-05
Acidification	kg SO2 eq	0,29857744	0	0,27699105	0,09530682	0,04282674	0,000351603	0,001912894
Eutrophication	kg PO4--- eq	0,0596601	0	0,07255713	0,02223532	0,0045672	4,61861E-05	0,002864926

3. Caracterización Palanquilla SAE 1029

SimaPro 8.0.4.30
Proyecto

Análisis de im Fecha: 04/02/2017 Período: 15:47
Electricity Ecuador

Calculation: Analizar
Results: Evaluación del impacto
Product: 1 ton Palanquilla SAE 1029 para elaboracion de varilla (of project Electricity Ecuador)
Método: CML-IA baseline V3.02 / EU25
Indicador: Caracterización
Skip categories: Nunca
Excluir procesos de infraestructura: N°
Excluir emisiones a largo plazo: N°
Sorted on item: Categoría de impacto
Sort order: Ascendente

Categoría de impacto	Unidad	Total	Palanquilla SA	Chatarra clasificada	Transport, Ferrosilicon {Ro\	Ferromanganese, Anthracite	Graphite {C	Calcium car	Argon, liquid, :	Nitrogen, liquid, at		
Abiotic depletion	kg Sb eq	2,01068E-05	0	3,2798E-07	0	1,93373E-06	0	0	5,07E-07	7,768E-06	0	0
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	3736,97347	0	46,37350037	0,001058	253,2700057	0,956023642	618,603	4,109192	69,902172	0,01147464	0,00423
Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	512,4729942	80	54,39425388	0,084511	7,63565932	15,3960376	46,82697	0,310294	5,3521253	0,15200061	0,05483
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	4,43755E-05	0	1,08916E-05	1,33E-08	5,50947E-07	9,57802E-07	3,65E-11	3,78E-08	3,896E-07	7,3183E-09	2,7E-09
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	0,185015383	0	0,002751793	1,28E-05	0,004322463	0,004532982	0,035813	9,87E-05	0,0174967	2,8229E-05	1E-05
Acidification	kg SO2 eq	4,912461715	0,057196227	0,341550057	0,000408	0,03580759	0,153822809	0,929441	0,002376	0,0308069	0,00070565	0,00026
Eutrophication	kg PO4--- eq	0,627319519	0,014871019	0,068246654	0,000107	0,022996367	0,053165448	0,016192	0,000634	0,0085765	0,0004957	0,00018

Oxygen, liquid, Lubricating oil	Fluorspar, 97%, at pl	Dolomite, :	Calcium carbide	Aluminium, prima	Quicklime, Aluminum, Water, completely softened, from							
0	4,4458E-06	0	0	2,31116E-06	2,66166E-07	2,38E-06	0	1,651E-07				
1,770220673	73,19949689	0,001712064	0,04317	20,11331287	3,821346042	191,062	0	0,3083023				
22,96715815	1,063845963	0,037871713	0,838839	1,634884642	0,324920147	33,05335	0,464743	0,0313767				
1,12862E-06	8,58604E-07	3,29379E-09	6,44E-08	1,30125E-07	3,42533E-08	2,19E-06	2,73E-12	3,011E-09				
0,004275486	0,000515711	1,08485E-05	0,000152	0,005489402	0,000272287	0,006309	0,000306	8,766E-06				
0,107859035	0,009235543	0,000238251	0,004151	0,00854502	0,003501932	0,048481	0,004294	0,0001369				
0,076371129	0,001893068	0,000108089	0,002093	0,003806888	0,00055708	0,00862	0,000121	5,65E-05				

Electricity, at s	Disposal, inert	Disposal, hazardous waste, 0% water, to underground deposit/DE U
0	0	0
2452,556704	0,025585033	0,841048387
235,6731438	1,809389413	4,366793754
2,65333E-05	4,57472E-07	1,19854E-07
0,099519971	0,000391339	0,00269756
3,147199107	0,010464218	0,015984141
0,335628933	0,003352681	0,009245391

4. Caracterización Varilla SAE 1029

SimaPro 8.0.4.30
 Proyecto

Análisis de im Fecha:
 Electricity Ecuador

04/02/2017 Período:

15:51

Calculation: Analizar
 Results: Evaluación del impacto
 Product: 1 ton Varilla SAE 1029 (of project Electricity Ecuador)
 Método: CML-IA baseline V3.02 / EU25
 Indicador: Caracterización
 Skip categories: Nunca
 Excluir procesos de infraestructura: N°
 Excluir emisiones a largo plazo: N°
 Sorted on item: Categoría de impacto
 Sort order: Ascendente

Categoría de impacto	Unidad	Total	Varilla SAE 1029	Palanquilla SAE	Transport, Heavy fuel oil, oil {GLO}	Lubricating
Abiotic depletion	kg Sb eq	2,1801E-05	0	2,08016E-05	0	9,569E-07
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	4424,38025	0	3866,107816	0	15,755847
Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	713,536531	0	530,1819402	0,006715	130,939733
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	7,6793E-05	0	4,59089E-05	2,54E-13	2,4815E-05
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	0,24779221	0	0,191408749	1,23E-06	0,03425222
Acidification	kg SO2 eq	6,57523288	0	5,082216067	2,57E-05	0,79478714
Eutrophication	kg PO4--- eq	0,76081611	0	0,648997086	5,86E-06	0,03706357

Water, completely : Electricity, at sup Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U

4,26727E-08	0	0
0,07968626	542,2142446	0,000963
0,008109858	52,10290775	0,068137
7,78254E-10	5,86602E-06	1,72E-08
2,26571E-06	0,022001997	1,47E-05
3,53811E-05	0,695786639	0,000394
1,46023E-05	0,074201256	0,000126

5. Contribución Agotamiento Abiótico

Calculation: Analizar
 Results: Contribución proceso
 Product: 1 ton Varilla SAE 1029 (of project Electricidad Ecuador)
 Método: CML-IA baseline V3.02 / EU25
 Indicador: Caracterización
 Categoría: Abiotic depletion
 Cortar: 2%
 Excluir procesos: N°
 Excluir emisores: N°
 Sorted on item: Total
 Sort order: Descendente

N°	Proceso	Proyecto	Unidad	Total	Transport, combination		
					Varilla SAE	Palanquilla SA truck, average fuel mix/US	
	El total de todos los procesos		kg Sb eq	2,18012E-05	0	2,08016E-05	0
	Procesos remanentes		kg Sb eq	8,3899E-06	0	8,02254E-06	0
1	Zinc concentrate {GLO} zinc-lead mine operation Alloc Def, U	Ecoinvent 3	kg Sb eq	2,19756E-06	0	1,99566E-06	0
2	Copper concentrate {RoW} copper mine operation Alloc Def, U	Ecoinvent 3	kg Sb eq	1,85138E-06	0	1,74515E-06	0
3	Gold {RoW} production Alloc Def, U	Ecoinvent 3	kg Sb eq	1,65652E-06	0	1,48034E-06	0
4	Zinc concentrate {GLO} zinc-lead mine operation Alloc Rec, U	Ecoinvent 3	kg Sb eq	1,36307E-06	0	1,36307E-06	0
5	Copper {RoW} gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining Alloc Def, U	Ecoinvent 3	kg Sb eq	1,29454E-06	0	1,21671E-06	0
6	Copper concentrate {RoW} copper mine operation Alloc Rec, U	Ecoinvent 3	kg Sb eq	1,24672E-06	0	1,24672E-06	0
7	Gold {RoW} production Alloc Rec, U	Ecoinvent 3	kg Sb eq	1,23924E-06	0	1,23924E-06	0
8	Lead concentrate {GLO} zinc-lead mine operation Alloc Def, U	Ecoinvent 3	kg Sb eq	9,02469E-07	0	8,8603E-07	0
9	Copper {RoW} gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining Alloc Rec, U	Ecoinvent 3	kg Sb eq	8,41093E-07	0	8,41093E-07	0
10	Chromite ore concentrate {GLO} production Alloc Def, U	Ecoinvent 3	kg Sb eq	8,18707E-07	0	7,65018E-07	0

Heavy fuel oil { Water, complete Electricity, at Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH						
0	9,56938E-07	4,26727E-08	0	0	0	0
0	3,53062E-07	1,42935E-08	0	0	0	0
0	1,99294E-07	2,60066E-09	0	0	0	0
0	1,01125E-07	5,10297E-09	0	0	0	0
0	1,74847E-07	1,33106E-09	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	7,40967E-08	3,73037E-09	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	1,53311E-08	1,10777E-09	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	3,91828E-08	1,45064E-08	0	0	0	0

6. Contribución Agotamiento Abiótico por Combustibles Fósiles

SimaPro 8.0.4 Contribución de proceso
 Proyecto Electricity Ecuador

Fecha: 04/02/2017 Período:

Calculation: Analizar
 Results: Contribución proceso
 Product: 1 ton Varilla SAE 1029 (of project Electricity Ecuador)
 Método: CML-IA baseline V3.02 / EU25
 Indicador: Caracterización
 Categoría: Abiotic depletion (fossil fuels)
 Cortar: 2%
 Excluir proces N°
 Excluir emisio N°
 Sorted on item Total
 Sort order: Descendente

N°	Proceso	Proyecto	Unidad	Total
	El total de todos los procesos		MJ	4424,38025
	Procesos remanentes		MJ	511,683332
1		Anthracite coal, at mine/RNA USLCI	MJ	639,979309
2	Electricity, generation at power plant, GT, NG, Termogas Machala I	Electricity Ecu	MJ	400,698213
3	Electricity, generation at power plant, ST, FO, Termoesmeraldas I	Electricity Ecu	MJ	387,043291
4	Electricity, generation at power plant, ST, FO, Gonzalo Zevallos	Electricity Ecu	MJ	351,3748
5	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Otros MCI, FO-Residuo-Crudo (Santa Elena II)	Electricity Ecu	MJ	342,63666
6	Electricity, generation at power plant, ST, FO, Trinitaria	Electricity Ecu	MJ	322,544362
7	Electricity, generation at power plant, GT, Diesel, Otros GT (Electroquil)	Electricity Ecu	MJ	214,510445
8	Electricity, generation at power plant, GT, NG, Termogas Machala II	Electricity Ecu	MJ	200,347477
9	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Termoguayas (Santa Elena II)	Electricity Ecu	MJ	199,229854
10	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Quevedo II (Santa Elena II)	Electricity Ecu	MJ	172,925953
11	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Jaramijó	Electricity Ecu	MJ	166,918189
12	Hard coal {WEU} mine operation Alloc Def, U	Ecoinvent 3 -	MJ	154,621597
13	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Santa Elena II	Electricity Ecu	MJ	141,466534
14	Electricity, generation at power plant, GT, Diesel, Electroquil	Electricity Ecu	MJ	112,290582
15	Electricity, generation at power plant, ST, FO, Otros TV (Gonzalo Zevallos)	Electricity Ecu	MJ	106,10965

15:53

								Disposal, inert material, 0% water, to
Varilla SAE Palanquilla Transport, Heavy fuel oil, Lubricating oil								sanitary landfill/CH U
0	3866,108	0	0,22168982	15,755847	0,07968626	542,214245	0,00096347	
0	495,4896	0	0,22168982	15,731811	0,079051427	0,16026199	0,00096347	
0	639,9793	0	0	0	0	0	0	
0	331,0403	0	0	0	0	69,6579135	0	
0	319,7592	0	0	0	0	67,2841236	0	
0	290,2913	0	0	0	0	61,0834654	0	
0	283,0722	0	0	0	0	59,5644155	0	
0	266,4728	0	0	0	0	56,0715434	0	
0	177,2197	0	0	0	0	37,2907828	0	
0	165,5188	0	0	0	0	34,8286734	0	
0	164,5955	0	0	0	0	34,6343845	0	
0	142,8643	0	0	0	0	30,0616791	0	
0	137,9009	0	0	0	0	29,0172814	0	
0	154,5969	0	0	0,024036	0,000634833	0	0	
0	116,8738	0	0	0	0	24,5927316	0	
0	92,76984	0	0	0	0	19,520745	0	
0	87,66341	0	0	0	0	18,4462435	0	

7. Contribución Calentamiento Global

Calculation: Analizar
 Results: Contribución proceso
 Product: 1 ton Varilla SAE 1029 (of project Electricity Ecuador)
 Método: CML-IA baseline V3.02 / EU25
 Indicador: Caracterización
 Categoría: Global warming (GWP100a)
 Cortar: 2%
 Excluir proces N°
 Excluir emisio N°
 Sorted on iter Total
 Sort order: Descendente

N°	Proceso Proyecto	Unidad	Total	Varilla SAE ´
	El total de todos los procesos	kg CO2 eq	713,53653	0
	Procesos remanentes	kg CO2 eq	167,03498	0
1	Heavy fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/CH U	Ecoinvent un kg CO2 eq	109,44075	0
2	Palanquilla SAE 1029 para elaboracion de varilla	Electricity Ec kg CO2 eq	82,764469	0
3	Operation, lorry 16-32t, EURO3/RER U	Ecoinvent un kg CO2 eq	48,404298	0
4	Anthracite coal, combusted in industrial boiler/RNA USLCI	kg CO2 eq	46,589356	0
5	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Otros MCI, FO-Residuo-Crudo (Santa Elena II)	Electricity Ec kg CO2 eq	34,819293	0
6	Electricity, generation at power plant, ST, FO, Gonzalo Zevallos	Electricity Ec kg CO2 eq	31,55616	0
7	Quicklime, in pieces, loose {RoW} production Alloc Def, U	Ecoinvent 3 · kg CO2 eq	30,592687	0
8	Electricity, generation at power plant, ST, FO, Termoesmeraldas I	Electricity Ec kg CO2 eq	27,212121	0
9	Electricity, generation at power plant, GT, NG, Termogas Machala I	Electricity Ec kg CO2 eq	27,047129	0
10	Electricity, generation at power plant, ST, FO, Trinitaria	Electricity Ec kg CO2 eq	23,812458	0
11	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Termoguayas (Santa Elena II)	Electricity Ec kg CO2 eq	20,246061	0
12	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Quevedo II (Santa Elena II)	Electricity Ec kg CO2 eq	17,573016	0
13	Electricity, generation at power plant, GT, Diesel, Otros GT (Electroquil)	Electricity Ec kg CO2 eq	16,690956	0
14	Diesel, burned in building machine/GLO U	Ecoinvent un kg CO2 eq	15,376747	0
15	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Santa Elena II	Electricity Ec kg CO2 eq	14,376059	0

Palanquilla	Transport, Heavy fuel oil, Lubricating oil	Water, complete	Electricity, at	Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U		
530,18194	0,006715	130,939733	0,22898784	0,00810986	52,1029077	0,06813743
130,51275	0,006715	21,3380492	0,22869716	0,00798745	14,8944276	0,04634528
0,0030176	0	109,437601	0	0	0,00012015	9,0595E-06
82,764469	0	0	0	0	0	0
48,404298	0	6,0418E-12	0	0	1,9091E-08	2,088E-13
46,589356	0	0	0	0	0	0
28,766261	0	0	0	0	6,0530325	0
26,070395	0	0	0	0	5,48576506	0
30,592274	0	0	0,00029067	0,00012241	0	0
22,481529	0	0	0	0	4,73059146	0
22,34522	0	0	0	0	4,70190916	0
19,672868	0	0	0	0	4,13958952	0
16,726459	0	0	0	0	3,51960232	0
14,518099	0	0	0	0	3,05491658	0
13,789378	0	0	0	0	2,90157805	0
15,068658	0	0,1640836	0	0	0,12222207	0,02178309
11,876905	0	0	0	0	2,49915326	0

8. Contribución Agotamiento de la Capa de Ozono

SimaPro 8.0.4 Contribución de proceso
 Proyecto Electricity Ecuador

Fecha: 04/02/2017 Período: 15:53

Calculation: Analizar
 Results: Contribución proceso
 Product: 1 ton Varilla SAE 1029 (of project Electricity Ecuador)
 Método: CML-IA baseline V3.02 / EU25
 Indicador: Caracterización
 Categoría: Ozone layer depletion (ODP)
 Cortar: 2%
 Excluir proces N°
 Excluir emisio N°
 Sorted on iter Total
 Sort order: Descendente

N°	Proceso	Proyecto	Unidad	Total	Varilla SAE	Palanquilla SAE	Transport, Heavy fuel oil,
	El total de todos los procesos		kg CFC-11 eq	7,6793E-05	0	4,59089E-05	2,54E-13 2,48152E-05
	Procesos remanentes		kg CFC-11 eq	8,1041E-06	0	7,43645E-06	2,54E-13 1,21481E-07
1	Crude oil, at production onshore/RAF U	Ecoinvent	kg CFC-11 eq	2,3685E-05	0	9,14946E-06	0 1,35007E-05
2	Crude oil, at production onshore/RME U	Ecoinvent	kg CFC-11 eq	1,9579E-05	0	1,51599E-05	0 1,96803E-06
3	Crude oil, at production/NG U	Ecoinvent	kg CFC-11 eq	1,3495E-05	0	4,04477E-06	0 9,1105E-06
4	Crude oil, at production onshore/RU U	Ecoinvent	kg CFC-11 eq	1,1931E-05	0	1,01183E-05	0 1,14561E-07

Lubricating Water, complete Electricity, at Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U

1,848E-07	7,78254E-10	5,866E-06	1,7227E-08
1,848E-07	7,78254E-10	3,6012E-07	5,0454E-10
0	0	1,0272E-06	7,2787E-09
0	0	2,4474E-06	3,2385E-09
0	0	3,3529E-07	4,5801E-09
0	0	1,6961E-06	1,6255E-09

9. Contribución Oxidantes Fotoquímicos

SimaPro 8.0.4.30 Contribución de proceso
 Proyecto Electricity Ecuador

Fecha: 04/02/2017 Período: 15:54

Calculation: Analizar
 Results: Contribución proceso
 Product: 1 ton Varilla SAE 1029 (of project Electricity Ecuador)
 Método: CML-IA baseline V3.02 / EU25
 Indicador: Caracterización
 Categoría: Photochemical oxidation
 Cortar: 2%
 Excluir procesos de ir N°
 Excluir emisiones a la N°
 Sorted on item: Total
 Sort order: Descendente

N°	Proceso Proyecto	Unidad	Total	Varilla SAE	Palanquilla
	El total de todos los procesos	kg C2H4 eq	0,24779221	0	0,1914087
	Procesos remanentes	kg C2H4 eq	0,06791634	0	0,0572339
1	Anthracite coal, combusted in industrial boiler/RNA USLCI	kg C2H4 eq	0,03648371	0	0,0364837
2	Heavy fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/CH U	Ecoinvent t kg C2H4 eq	0,02723343	0	7,509E-07
3	Electricity, generation at power plant, ST, FO, Termoesmeraldas I	Electricity t kg C2H4 eq	0,01732217	0	0,0143109
4	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Otros MCI, FO-Residuo-Crudo (Santa Elena II)	Electricity t kg C2H4 eq	0,01677299	0	0,0138572
5	Calcium carbide, technical grade {RoW} production Alloc Rec, U	Ecoinvent t kg C2H4 eq	0,0161088	0	0,0161088
6	Electricity, generation at power plant, ST, FO, Trinitaria	Electricity t kg C2H4 eq	0,01317004	0	0,0108805
7	Electricity, generation at power plant, ST, FO, Gonzalo Zevallos	Electricity t kg C2H4 eq	0,01234157	0	0,0101961
8	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Termoguayas (Santa Elena II)	Electricity t kg C2H4 eq	0,00975284	0	0,0080574
9	Natural gas, sour, burned in production flare/MJ/GLO U	Ecoinvent t kg C2H4 eq	0,00915468	0	0,007764
10	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Quevedo II (Santa Elena II)	Electricity t kg C2H4 eq	0,00846519	0	0,0069936
11	Sugarcane, at farm/BR U	Ecoinvent t kg C2H4 eq	0,00760464	0	0,0062826
12	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Santa Elena II	Electricity t kg C2H4 eq	0,00692517	0	0,0057213
13	Heavy fuel oil, at refinery/RER U	Ecoinvent t kg C2H4 eq	0,00579905	0	0,0047822
14	Aluminium, primary, liquid, at plant/RER U	Ecoinvent t kg C2H4 eq	-0,00725842	0	-0,007264

Transport, Heavy fuel oil, Lubricating Water, completely Electricity, at Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U

1,23E-06	0,03425222	0,000111	2,26571E-06	0,022002	1,4737E-05
1,23E-06	0,00689229	0,000111	2,26571E-06	0,00366222	1,3387E-05
0	0	0	0	0	0
0	0,02723265	0	0	2,9897E-08	2,2544E-09
0	0	0	0	0,00301131	0
0	0	0	0	0,00291584	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,0022895	0
0	0	0	0	0,00214547	0
0	0	0	0	0,00169545	0
0	8,8035E-05	0	0	0,00130137	1,2458E-06
0	0	0	0	0,0014716	0
0	1,6516E-10	0	0	0,001322	3,1123E-12
0	0	0	0	0,00120388	0
0	3,6061E-05	0	0	0,00098074	6,1368E-08
0	3,1841E-06	0	0	2,5981E-06	4,0437E-08

10. Contribución Acidificación

SimaPro 8.0.4 Contribución de proceso
 Proyecto Electricity Ecuador

Fecha: 04/02/2017 Período:

Calculation: Analizar
 Results: Contribución proceso
 Product: 1 ton Varilla SAE 1029 (of project Electricity Ecuador)
 Método: CML-IA baseline V3.02 / EU25
 Indicador: Caracterización
 Categoría: Acidification
 Cortar: 2%
 Excluir proces N°
 Excluir emisio N°
 Sorted on iter Total
 Sort order: Descendente

N°	Proceso	Proyecto	Unidad	Total
	El total de todos los procesos		kg SO2 eq	6,57523288
	Procesos remanentes		kg SO2 eq	1,22073797
1	Anthracite coal, combusted in industrial boiler/RNA	USLCI	kg SO2 eq	0,9529307
2	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Otros MCI, FO-Residuo-Crudo (Santa Elena II)	Electricity	kg SO2 eq	0,81802188
3	Heavy fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/CH U	Ecoinvent	kg SO2 eq	0,72140866
4	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Termoguayas (Santa Elena II)	Electricity	kg SO2 eq	0,47564782
5	Electricity, generation at power plant, ST, FO, Termoesmeraldas I	Electricity	kg SO2 eq	0,47302459
6	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Quevedo II (Santa Elena II)	Electricity	kg SO2 eq	0,41284903
7	Electricity, generation at power plant, ST, FO, Trinitaria	Electricity	kg SO2 eq	0,36137374
8	Electricity, generation at power plant, ST, FO, Gonzalo Zevallos	Electricity	kg SO2 eq	0,35861177
9	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Santa Elena II	Electricity	kg SO2 eq	0,33774179
10	Natural gas, sour, burned in production flare/MJ/GLO U	Ecoinvent	kg SO2 eq	0,23502936
11	Operation, lorry 16-32t, EURO3/RER U	Ecoinvent	kg SO2 eq	0,20785559

15:54

Varilla SAE	Palanquilla	Transport, Heavy fuel oil, Lubricating	Water, complete	Electricity, at	Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U		
0	5,0822161	2,57E-05	0,79478714	0,0019879	3,5381E-05	0,69578664	0,00039406
0	1,0475836	2,57E-05	0,07113909	0,0019879	3,5381E-05	0,09960427	0,00036201
0	0,9529307	0	0	0	0	0	0
0	0,6758159	0	0	0	0	0,14220602	0
0	1,989E-05	0	0,72138792	0	0	7,9197E-07	5,9718E-08
0	0,3929606	0	0	0	0	0,08268725	0
0	0,3907934	0	0	0	0	0,08223123	0
0	0,3410788	0	0	0	0	0,07177023	0
0	0,298552	0	0	0	0	0,06282169	0
0	0,2962702	0	0	0	0	0,06234155	0
0	0,2790283	0	0	0	0	0,05871348	0
0	0,1993271	0	0,00226013	0	0	0,03341013	3,1984E-05
0	0,2078556	0	2,5945E-14	0	0	8,198E-11	8,9663E-16

11. Contribución Eutrofización

SimaPro 8.0.4 Contribución de proceso
 Proyecto Electricity Ecuador

Fecha: 04/02/2017 Período: 15:55

Calculation: Analizar
 Results: Contribución proceso
 Product: 1 ton Varilla SAE 1029 (of project Electricity Ecuador)
 Método: CML-IA baseline V3.02 / EU25
 Indicador: Caracterización
 Categoría: Eutrophication
 Cortar: 2%
 Excluir proces N°
 Excluir emisio N°
 Sorted on iter Total
 Sort order: Descendente

N°	Proceso	Proyecto	Unidad	Total	Varilla SAE
	El total de todos los procesos		kg PO4--- eq	0,76081611	0
	Procesos remanentes		kg PO4--- eq	0,19257819	0
1	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Otros MCI, FO-Residuo-Crudo (Santa Elena II)	Electricity Ecu	kg PO4--- eq	0,11430637	0
2	Disposal, spoil from lignite mining, in surface landfill/GLO U	Ecoinvent unit	kg PO4--- eq	0,10231894	0
3	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Termoguayas (Santa Elena II)	Electricity Ecu	kg PO4--- eq	0,06646469	0
4	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Quevedo II (Santa Elena II)	Electricity Ecu	kg PO4--- eq	0,0576895	0
5	Operation, lorry 16-32t, EURO3/RER U	Ecoinvent unit	kg PO4--- eq	0,05407121	0
6	Electricity, generation at power plant, MCI, FO, Santa Elena II	Electricity Ecu	kg PO4--- eq	0,04719438	0
7	Diesel, burned in building machine/GLO U	Ecoinvent unit	kg PO4--- eq	0,02804188	0
8	Crude oil, at production onshore/RU U	Ecoinvent unit	kg PO4--- eq	0,02378704	0
9	Spoil from hard coal mining {GLO} treatment of, in surface landfill Alloc Def, U	Ecoinvent 3 -	kg PO4--- eq	0,02124432	0
10	Disposal, spoil from coal mining, in surface landfill/GLO U	Ecoinvent unit	kg PO4--- eq	0,01949373	0
11	Heavy fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/CH U	Ecoinvent unit	kg PO4--- eq	0,01824095	0
12	Palanquilla SAE 1029 para elaboracion de varilla	Electricity Ecu	kg PO4--- eq	0,0153849	0

Palanquilla	Transport, r	Heavy fuel oil,	Lubricating oil	Water, comple	Electricity, at s	Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U
0,648997	5,86E-06	0,03706357	0,000407474	1,4602E-05	0,07420126	0,00012625
0,163238	5,86E-06	0,01176799	0,000343865	1,1541E-05	0,01714512	6,6261E-05
0,094435	0	0	0	0	0,01987117	0
0,094056	0	0,00531722	0	0	0,00293366	1,2117E-05
0,05491	0	0	0	0	0,01155431	0
0,047661	0	0	0	0	0,01002882	0
0,054071	0	6,7492E-15	0	0	2,1326E-11	2,3325E-16
0,03899	0	0	0	0	0,00820433	0
0,02748	0	0,00029923	0	0	0,00022289	3,9725E-05
0,020174	0	0,00022841	0	0	0,00338158	3,241E-06
0,021178	0	0	6,36086E-05	3,0611E-06	0	0
0,017419	0	0,0012103	0	0	0,00085934	4,9087E-06
5,03E-07	0	0,01824043	0	0	2,0025E-08	1,51E-09
0,015385	0	0	0	0	0	0