

**APLICACIÓN DE LOS BALANCES DE MASA PARA ESTABLECER LOS
EFECTOS DE LA INCORPORACIÓN DE RESIDUOS DE BATERÍAS
GASTADAS DURANTE LA PRODUCCIÓN DE ACERO EN EL HORNO DE
ARCO ELÉCTRICO**

GIOVANNI ALEXANDER VÁSQUEZ OREJARENA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2020**

**APLICACIÓN DE LOS BALANCES DE MASA PARA ESTABLECER LOS
EFECTOS DE LA INCORPORACIÓN DE RESIDUOS DE BATERÍAS
GASTADAS DURANTE LA PRODUCCIÓN DE ACERO EN EL HORNO DE
ARCO ELÉCTRICO**

GIOVANNI ALEXANDER VÁSQUEZ OREJARENA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director

PEDRO LUIS DELVASTO ANGARITA

PhD. en Ciencia y Tecnología de Materiales

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2020

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. ANTECEDENTES	15
1.1 Baterías: generalidades	15
1.2. Procesos de reciclaje de baterías	15
1.3 Horno de arco eléctrico	17
1.4 Proceso de producción de acero en el horno de arco eléctrico	19
2. OBJETIVOS	22
2.1 Objetivo general	22
2.2 Objetivos específicos	22
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	23
3.1 RECOPIACIÓN DE DATOS	24
3.1.1 Composición de la chatarra y materiales	24
3.1.2 Composición y distribución de las baterías	26
3.1.3 Fases que constituyen los materiales del electrodo de las baterías	28
3.2 EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN TERMODINÁMICA Y CÁLCULO DE BALANCE DE MASA	29
3.3 Evaluación del efecto en conjunto de la adición de baterías y elementos reductores	31
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1 SIMULACIONES TERMODINÁMICAS Y BALANCES DE MASA	33
4.1.1 Simulación termodinámica bajo condiciones típicas de fabricación de acero en el horno de arco eléctrico.	33
4.1.2 Simulación termodinámica de fabricación de acero base en el horno de arco eléctrico junto con una mezcla típica de 1% de baterías	36
4.1.3 Simulaciones termodinámicas de la inclusión de un mayor porcentaje de baterías	42

4.1.4 Simulaciones termodinámicas de la inclusión de elementos reductores a la simulación acero base con una mezcla típica de 1% de baterías	44
4.2 EVALUACIÓN DE LA ADICIÓN DE BATERÍAS Y DE AGENTES REDUCTORES	47
4.2.1 Niveles de manganeso en el acero.	47
4.2.2 Niveles de carbono en el acero.	47
4.2.3 Optimización de la cantidad de baterías y de agentes reductores.	53
5. RECOMENDACIONES	56
6. CONCLUSIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	58
ANEXOS	63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición en porcentaje másico de chatarra considerada típica en la investigación	24
Tabla 2. Composición de las especies de entrada en la simulación	26
Tabla 3. Composición de la mezcla de baterías utilizada	28
Tabla 4. Datos de entrada para el programa HSC utilizado para simular el proceso de producción del acero.....	30
Tabla 5. Matriz de valores de porcentaje de baterías y agentes reductores Si, Al y C evaluados.....	32
Tabla 6. Composiciones resultantes del acero, escoria y polvo de la simulación termodinámica del acero base	34
Tabla 7. Comparación de la composición química de la escoria de horno de arco eléctrico simulada junto con el rango de composición típica	36
Tabla 8. Composiciones resultantes del acero, escoria y polvo de la simulación termodinámica de fabricación de acero base en el horno de arco eléctrico junto con una mezcla típica de 1% de baterías.	37
Tabla 9. Valores de Mn, C, Cu y Ni en acero SAE 1020 (Norma NTC 243) y barras corrugadas y lisas de acero (Norma NTC 2289).....	53
Tabla 10. Optimización de condiciones para alcanzar los valores medios, límites máximos y mínimos de la norma NTC 243 para Mn y C en acero.....	55

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Representación esquemática de un horno de arco eléctrico típico.....	18

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Distribución en peso de las baterías postconsumo típicas (n-PbA) por sistema electroquímico	27
Gráfica 2. Efecto de la incorporación de un mayor porcentaje de baterías sobre la cantidad de metal presente en el acero	43
Gráfica 3. Efecto del aluminio como reductor en la simulación del acero base con 1% de baterías.....	45
Gráfica 4. Efecto del carbono como reductor en la simulación del acero base con 1% de baterías.....	45
Gráfica 5. Efecto del Silicio presente en el ferrosilicio como reductor en la simulación del acero base con 1% de baterías.....	46
Gráfica 6. Gráficas de contorno para el Manganeso en el acero en función de la adición de A. % de baterías y FeSi. B. % de baterías y aluminio. C.% de baterías y Carbono.	48
Gráfica 7. Gráficas de contorno para el Carbono en el acero en función de la adición de A. % de baterías y FeSi. B. % de baterías y Aluminio. C. % de baterías y Carbono.	49
Gráfica 8. Gráficas de contorno para el cobre en el acero en función de la adición de A. % de baterías y FeSi. B. % de baterías y Aluminio. C. % de baterías y Carbono	51
Gráfica 9. Gráficas de contorno para el níquel en el acero en función de la adición de A. % de baterías y FeSi. B. % de baterías y Aluminio. C. % de baterías y Carbono	52
Gráfica 10. Superposición de las gráficas de contorno con variación de A. FeSi B. Al y C. C. Los valores de las demás variables de agentes reductores se mantuvieron constantes en 2.5Kg /ton de chatarra.....	54

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Balance de componentes típico de diferentes tipos de baterías desechadas.....	63
Anexo B. Análisis químico típico de los materiales anódicos y catódicos de diferentes tipos de baterías desechadas	64
Anexo C. Captura de la hoja de cálculo empleada para realizar los balances de masa	65
Anexo D. Materiales de entrada.....	66
Anexo E. Materiales de salida.....	68
Anexo F. Optimización de respuesta para valores límites inferiores dentro de la norma NTC 243 para el acero SAE 1020	71
Anexo G. Optimización de respuesta para valores medios dentro de la norma NTC 243 para el acero SAE 1020	72
Anexo H. Optimización de respuesta para valores límites máximos dentro de la norma NTC 243 para el acero SAE 1020	73
Anexo I. Simulación para la optimización de respuesta de los valores límites inferiores	74
Anexo J. Simulación para optimización de respuesta para valores medios.....	75
Anexo K. Simulación para la optimización de respuesta de los valores límites máximos	76

RESUMEN

TÍTULO: APLICACIÓN DE LOS BALANCES DE MASA PARA ESTABLECER LOS EFECTOS DE LA INCORPORACIÓN DE RESIDUOS DE BATERÍAS GASTADAS DURANTE LA PRODUCCIÓN DE ACERO EN EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO*

AUTOR: Vásquez Orejarena, Giovanni Alexander**

PALABRAS CLAVE: Baterías gastadas, horno de arco eléctrico, simulación termodinámica, reciclaje.

DESCRIPCIÓN:

La investigación abordó, de forma teórica, el impacto de la adición de diferentes tipos de baterías gastadas en un horno de arco eléctrico, durante el proceso de producción de acero convencional. Además, se analizaron las posibles contramedidas necesarias para adoptar en dicho proceso, con el fin de disminuir cualquier efecto indeseable que pudiera generarse y aumentar los efectos positivos de procesar baterías. El proceso de producción de acero convencional en el horno de arco eléctrico fue modelado con el paquete termoquímico HSC Chemistry® y hojas de cálculo. Este se comparó con un modelo en el que se utilizan parcialmente las baterías como material alternativo o como método de inertización de las baterías en las mismas condiciones de funcionamiento.

Se obtuvieron resultados favorables para la integración de los desechos de baterías gastadas en una operación de producción de acero mediante el horno de arco eléctrico, pues se observó la disminución del uso o el reemplazo de elementos aleantes como el manganeso, níquel y cobalto por materiales de desecho como baterías gastadas que contienen estos elementos, junto con los agentes reductores aluminio, carbono y ferrosilicio, lo cual permitió la valoración e inertización de las baterías. Finalmente, se consiguió una aleación con unos requerimientos de composición química específicos mediante el uso de los metales presentes en las baterías gastadas, junto con los elementos reductores.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Pedro Luis Delvasto Angarita, PhD.

ABSTRACT

TITLE : APPLICATION OF MASS BALANCES TO ESTABLISH THE EFFECTS OF INCORPORATING WASTE SPENT BATTERIES DURING THE PRODUCTION OF STEEL IN THE ELECTRIC ARC FURNACE*

AUTHOR: Vásquez Orejarena, Giovanni Alexander **

KEYWORDS : Spent batteries, electric arc furnace, thermodynamic simulation, recycling.

DESCRIPTION :

The research addressed, in a theoretical way, the impact of the addition of different types of spent batteries in an electric arc furnace, during the conventional steel production process. In addition, the possible countermeasures necessary to be taken in such process were analysed in order to decrease any undesirable effects that could be generated and to increase the positive effects of processing batteries. The conventional steel production process in the electric arc furnace was modeled with the HSC Chemistry® thermochemical package and spreadsheets. This was compared with a model in which the batteries are partially used as an alternative material or as a method of inerting the batteries under the same operating conditions.

Favourable results were obtained for the integration of spent battery waste into a steel production operation using the electric arc furnace, because the use or replacement of alloying elements such as manganese, nickel and cobalt by waste materials such as spent batteries containing these elements was observed, together with the reducing agents aluminium, carbon and ferrosilicon, these results allowed the batteries to be valorized and inertized. Finally, an alloy with specific chemical composition requirements was achieved by using the metals present in the spent batteries, together with the reducing elements.

* Degree work

** Department of Physical-Chemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Pedro Luis Delvasto Angarita, PhD.

INTRODUCCIÓN

El auge tecnológico produce cada vez más residuos electrónicos, entre ellos destacan las baterías gastadas de uso doméstico que provienen de dispositivos electrónicos portátiles. Si estas no son recolectadas y resultan en los sistemas comunes de manejo de residuos municipales, incompatibles con este tipo de desechos¹, se depositan en rellenos donde se generan líquidos lixiviados y gases, producto de su descomposición química, lo que origina la contaminación en suelos y fuentes hídricas.

La mayoría de los procesos de reciclaje han sido desarrollados para recibir tipos específicos de baterías, lo cual hace necesario la separación, clasificación y desensamble manual o mediante equipos diseñados. Lo anterior es un proceso complejo y económicamente poco viable si se implementara para procesar residuos a pequeña escala y sin un financiamiento u obligación legal.²

Por tanto, una alternativa de reciclaje de baterías gastadas es su integración con operaciones existentes de reciclaje de metales. Un área de interés son los procesos pirometalúrgicos, en los que se producen o reciclan materiales metalíferos, estos involucran el uso de altas temperaturas, las cuales pueden ser aprovechadas para fundir las baterías desechadas. De esta manera, los procesos pirometalúrgicos convencionales podrían aceptar pequeñas cantidades de estos residuos. Es de esperar que la adición de baterías en estos procesos genere determinados cambios químicos en la fase metálica, escoria y gases.

En concordancia con lo expuesto, en el presente trabajo se pretende encontrar, de forma teórica, empleando datos bibliográficos y simulaciones termodinámicas, el

¹ VIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MATERIALES CIM. (28-30, OCTUBRE, 2015: Paipa, Colombia). Minería urbana: las pilas y baterías gastadas como recurso metalífero. Paipa: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2015, p.2

² ESPINOSA, Denise y BORGES, Marcelo. Recycling batteries. En: Goodship, Vannessa y Stevels, Ab. Waste electrical and electronic equipment (WEE) handbook. 30 ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. p. 373.

impacto que tendría la adición de diferentes tipos de baterías gastadas en un sistema pirometalúrgico típico, como lo es el horno de arco eléctrico, durante el proceso de producción de acero convencional, a fin de evaluar la posibilidad de tratar estos residuos en dicho proceso industrial. Para llevar a cabo lo anterior, se consideran y comparan dos escenarios: el uso parcial de las baterías en el horno de arco eléctrico como un material alternativo o como método de inertización y el funcionamiento pirometalúrgico típico, sin adición de baterías. Por otro lado, se pretende visualizar las posibles contramedidas necesarias para adoptar en dichos procesos, con el fin de disminuir cualquier efecto indeseable que pudiera generarse al procesar baterías en el horno de arco eléctrico.

1. ANTECEDENTES

1.1 Baterías: generalidades

Una celda o pila es la unidad básica electroquímica que convierte la energía que almacena como reacciones de óxido-reducción en energía eléctrica, debido a las reacciones electroquímicas que suceden en sus electrodos. Si estas reacciones no son reversibles, se denominan primarias y si son reversibles, la pila puede recargarse y se considera secundaria. La batería se compone de dos o más pilas conectadas en serie o paralelo³. Esta investigación utiliza solo baterías posconsumo domésticas sin plomo-ácido (n-PbA) y tampoco incluye baterías que contienen mercurio.

Algunos componentes de esta tipología de baterías, como plásticos, carcasa/piezas de metal y papel/cartón (ver anexo A) son residuos que pueden ser reutilizados; asimismo, Sabroso y Pastor⁴ mencionan que los elementos como Zn, Mn, Ni, Cd, Fe, Co (ver anexo B) pueden originar efectos negativos sobre la salud humana y en los ecosistemas. Por tanto, si estos desechos no se tratan adecuadamente, conllevan a contaminación ambiental y, a su vez, al desaprovechamiento de sus materiales que pueden ser factibles para su uso como fuente de materia prima.

1.2. Procesos de reciclaje de baterías

Es importante destacar que existen procesos de reciclaje de baterías que se clasifican en mecánicos, hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos. Los procesos mecánicos tienen el objetivo de reducir el tamaño de las baterías mediante trituración para liberar sus constituyentes; posteriormente, se realiza una separación física que hace uso de propiedades tales como magnetismo, diferencia de densidad,

³ PISTOIA, Gianfranco. Batteries for portable devices. Ámsterdam: ELSEVIER, 2005. p.1

⁴ SABROSO, María del Carmen y PASTOR, Ana. Guía sobre suelos contaminados. Zaragoza: Gobierno de Aragón, Departamento de Economía, Hacienda y empleo, 2004. p.44-54.

tamaño y forma de partícula.⁵ Los productos de este proceso pueden ser usados como materias primas o, debido a su limitada eficiencia, en un procedimiento posterior de reciclaje con el objetivo de reducir la cantidad de material en procesos posteriores.

El proceso hidrometalúrgico consiste en someter los materiales que componen a las baterías a una etapa de lixiviación, con el fin de transferir los metales de interés de una fase sólida a una solución acuosa para su posterior concentración y recuperación. Esta ruta es más compleja y solo puede aplicarse a tipos específicos de baterías, lo cual requiere de menor variedad en la composición química de las baterías, pero ocasiona mayores porcentajes de recuperación y una más alta selectividad de metales en comparación con los demás procesos mencionados⁶. Este proceso prácticamente no genera gases de salida, sin embargo, sí produce aguas residuales que deben ser tratadas.

Por último, los procesos pirometalúrgicos, en los que se basa la presente investigación, pueden recuperar metales de baterías a elevadas temperaturas mediante su fusión y evaporación, a fin de segregarlo de los demás materiales que tienen un mayor punto de ebullición⁷.

La primera etapa dentro del proceso pirometalúrgico es el tratamiento térmico de las baterías por pirólisis⁸, la cual permite eliminar sustancias orgánicas, agua y la separación de metales con bajos puntos de ebullición (Hg, Zn, Cd) mediante la evaporación. Posteriormente, se reducen las fracciones metálicas que pueden utilizarse como materias primas para ajustar la composición del acero. Finalmente,

⁵ PAN, Qiaoyan y WEYHE, Reiner. Review of recycling process with directions for Li-S battery recycling. [En línea]. Funding & tender opportunities. Single Electronic Data Interchange Area. European Comission: High energy lithium sulphur cells and batteries. 2016.

⁶ NISSEN, Nils. The European Directive on ecodesign. En: Vannessa Goodship and Ab Stevels. Waste electrical and electronic equipment (WEE) handbook. 30 ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. p. 400.

⁷ *Íbid.*, p.400

⁸ PISTOIA, Op. Cit, p.237

el gas generado en la pirólisis se incinera y luego se apaga para evitar la generación de dioxinas.⁹

1.3 Horno de arco eléctrico

Dentro de la pirometalurgia se hace uso de diversos reactores para el proceso, como el alto horno, horno rotatorio, horno de inducción, horno convertidor, horno cubilote, entre otros. No obstante, el horno de arco eléctrico es el eje central de esta investigación. Este tipo de horno utiliza un arco eléctrico continuo como fuente de calor, el cual es generado entre los electrodos de grafito que están sometidos a una diferencia de potencial, con respecto a la carga metálica que se introduce en el horno. El aumento de la temperatura es causado por el choque de los electrones y los iones liberados por las reacciones químicas producidas en el material que se está fundiendo.¹⁰ Este arco puede ser directo, al producirse entre los electrodos y el metal a fundir; e indirecto, donde el arco salta entre dos electrodos horizontales.

A continuación, se muestra una representación esquemática de un horno de arco eléctrico típico.

⁹ BERNARDES, Andrea; ESPINOSA, Denise y TENORIO, Jorge. Recycling of batteries: a review of current processes and technologies. En: Journal of Power Sources. Ámsterdam. 2004. Vol. 130, No. 1-2. p. 296.

¹⁰ HENRÍQUEZ, Omar y AGUILAR, Erick. Diseño de un horno de arco eléctrico a escala de laboratorio para la obtención de silicio metalúrgico. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del litoral. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, 2015. p.2.

Se ha reportado que los hornos de arco eléctrico son herramientas que pueden emplearse de manera exitosa para el reciclaje de baterías en la industria metalúrgica. En Europa, por ejemplo, diversas empresas como Recytec (Suiza); Nedstahl, (Países Bajos) y Valdi, (Francia) utilizan los hornos de arco. Generalmente, las baterías se añaden junto a la chatarra sin adiciones y sin requerimientos operacionales, ni modificaciones en la instalación adicionales¹³.

1.4 Proceso de producción de acero en el horno de arco eléctrico

La industria siderúrgica colombiana está compuesta por una siderúrgica integrada que utiliza como materias primas: mineral de hierro, carbón y caliza, además de un porcentaje de acero reciclado. Asimismo, las plantas siderúrgicas semi-integradas emplean principalmente acero reciclado como materia prima¹⁴.

El horno de arco eléctrico es utilizado para el procesamiento de la chatarra, este proceso inicia con la carga en el horno distribuida de acuerdo con su densidad. Mediante el arco eléctrico generado por los electrodos, se inicia el proceso de fusión que contempla las fases de oxidación, defosforación y formación de la escoria. En la fase oxidante, el hierro, silicio y manganeso se oxidan, además de otros elementos no deseados, lo cual genera reacciones exotérmicas que reducen el consumo energético. La adición de óxido de calcio (cal) al metal líquido genera la fase de defosforación, el fósforo pasa a formar parte de la escoria negra junto con los demás óxidos generados. Se adiciona/inyecta carbón en polvo para reducir los óxidos de hierro, lo cual genera monóxido de carbono (CO) gas y este pasa a través de la escoria espumándola; esta última estabiliza el arco y mejora la eficiencia térmica.

Después de retirar la escoria negra, el proceso continúa con el afino, el cual se compone por las fases de desulfuración y desoxidación de los óxidos metálicos.

¹³ PISTOIA, G; WIAUX, J.-P. y WOLSKY, S.P. Used Battery Collection and Recycling. Ámsterdam: ELSEVIER, 2001. p.213.

¹⁴ CADAVID, Gabriel. Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del proceso siderúrgico. Trabajo de grado, Magíster en Ingeniería Química. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2014. p.27.

Estas se producen por la generación de escoria reductora denominada blanca mediante elementos desoxidantes como cal, espato-flúor, coque o grafito. Finalmente, se desescoria y se cuela el metal líquido fundido.¹⁵

A su vez, en los procesos de producción como el cargado en el horno, la fusión, el refinado, el colado y, principalmente, la formación de la escoria espumosa, se genera material particulado en cantidades aproximadas de 15 a 20 kg de polvos por tonelada de chatarra. Los elementos volátiles como el zinc, cadmio y el plomo son evaporados desde el baño de metal líquido y otras zonas de alta temperatura hacia los gases de salida, estos se oxidan para formar óxidos y compuestos complejos que se condensan y son arrastrados mecánicamente por el flujo de aire extractivo¹⁶; la principal fuente de estos elementos volátiles es la carga de chatarra de acero galvanizado y ennegrecido.

A pesar de que en Colombia se utiliza el horno de arco eléctrico para el procesamiento de chatarra, el reciclaje de baterías mediante este proceso pirometalúrgico en el país es todavía un campo sin estudio, por lo cual se hace pertinente el desarrollo de la presente investigación.

El uso de baterías como material sin procesar en las industrias de producción del acero es una de las posibilidades de reciclaje debido a la presencia de materiales como hierro, cromo, níquel y manganeso que se pueden utilizar para ajustar la composición del acero. Sin embargo, se presentan compuestos como el zinc, cadmio y cobre que podrían interferir con su calidad. Muchos países han realizado procesos de reciclaje mediante métodos pirometalúrgicos basados en la utilización de hornos de arco eléctrico como método para destruir desechos como jeringas¹⁷ o

¹⁵ IHOBE. Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones: escorias de acerías. Bilbao: IHOBE, 19999. p. 35-37

¹⁶ NDLOVU, Sehliselo; SIMATE, Geoffrey S. y MATINDE, Elias. Waste Production and Utilization in the Metal Extraction Industry. Boca Ratón: CRC Press, 2017. p. 147.

¹⁷ GHODRAT, Maryam. Thermodynamic Analysis of Incineration Treatment of Waste Disposable Syringes in an EAF Steelmaking Process. *En*: SUN, Ziqui, *et.al*. Energy Technology 2018. Carbon Dioxide Management and Other Technologies. 2018 ed. Suiza: Springer, 2018. p.77-88.

residuos médicos cortantes.¹⁸ A su vez, algunas de investigaciones afirman que las baterías zinc-carbono y alcalinas sin mercurio tienen una sinergia muy buena con las alimentaciones típicas utilizadas en el proceso de reciclado de chatarra metálica de la industria metalúrgica¹⁹; por ende, el horno de arco eléctrico de fabricación de acero es una importante área de interés para el reciclaje de baterías usadas en Colombia.

¹⁸ GHODRAT, Maryam; RASHIDI, Maria y SAMALI, Bijan. Life Cycle Assessments of Incineration Treatment for Sharp Medical Waste. En: LEI, Zhang, *et.al.* Energy Technology 2017. Carbon Dioxide Management and Other Technologies. 2017 ed. Suiza: Springer, 2017. p.131-143.

¹⁹ PISTOIA, Op. Cit, p.211

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Aplicar balances de masa sustentados en simulaciones termodinámicas para determinar los cambios que se registran durante la producción de acero en un horno de arco eléctrico cuando se le incorporan baterías gastadas como materia prima secundaria.

2.2 Objetivos específicos

- Establecer un modelo simplificado del proceso de fabricación de acero en un horno de arco eléctrico, instrumentalizado en Microsoft Excel ® empleando información real de planta o disponible en fuentes bibliográficas.

- Realizar comparaciones entre los balances de masa en el proceso de producción de acero en el horno de arco eléctrico sin y con residuos de baterías gastadas.

- Extraer, a partir de los resultados obtenidos, recomendaciones útiles que permitan emplear el proceso de producción de acero en horno de arco eléctrico como método de valorización o inertización de los residuos de baterías gastadas

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se realizaron balances de masa mediante hojas de cálculo en el software Microsoft Excel® (ver anexo C) con el fin de determinar las cantidades de chatarra, caliza, oxígeno, carbono y otras materias primas que se ingresaron a la simulación termodinámica (ver anexo D). Con esta información, se generó un modelo que busca ser similar a un proceso real de fabricación de acero y se compararon los resultados con datos reales de planta y de referencias bibliográficas para realizar su validación.

A partir de este primer modelo, se realizó otro con la inclusión de la mezcla de baterías, se determinaron los cambios que se registraron y se comparó cómo se afecta el acero, polvo y escoria respecto al modelo de producción de acero inicial.

Se ejecutó un tercer modelo, en el cual se ingresó una determinada cantidad de baterías junto con materiales reductores que permitieran la fabricación de un acero con una composición química específica, con el fin de determinar si las baterías gastadas podían ser usadas para disminuir o reemplazar el uso de elementos aleantes. Por último, se realizaron graficas de contorno y optimización de respuesta utilizando el paquete estadístico MINITAB 19 (Minitab Inc., Pennsylvania, USA), los resultados de estas se compararon con los rangos de composición química expresados en las normas técnicas colombianas NTC 243²⁰ y NTC 2289²¹. A continuación, se evidencian las materias primas y su composición porcentual en masa que serán utilizadas en el desarrollo de la investigación.

²⁰ COLOMBIA. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Norma técnica colombiana, NTC 243. Composiciones químicas de colada para aceros al carbono. [en línea]. Bogotá, D.C.: ICONTEC. 2013. 17p.

²¹ COLOMBIA. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Norma técnica colombiana, NTC 2289. Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación, para refuerzo de concreto. [en línea]. Bogotá, D.C.: ICONTEC. 2007. 22p.

3.1 RECOPIACIÓN DE DATOS

3.1.1 Composición de la chatarra y materiales

Se decidió utilizar 3 diferentes composiciones de chatarra referenciadas en ^{22 23 24} y evidenciadas en la tabla 1. Debido a que no se hallan estudios acerca de la cantidad típica para una colada, se realizó una aproximación del uso con base en ²⁴ de la siguiente manera: chatarra fundida pesada (HMS), la cual se divide en dos categorías HMS 1 (49%) y HMS 2 (18%). HMS 2 contiene zinc, por lo cual se supone que el contenido de este elemento es de al menos 1% de acuerdo con ²⁵; triturado (27%); producción interna (6%). La composición usada en este proyecto se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. Composición en porcentaje másico de chatarra considerada típica en la investigación

Chatarra	Fe	Mn	C	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	Zn
P. interna	97.31	0.50	0.55	0.03	0.04	0.35	0.90	0.10	0.03	0.20	-	-	-	-
HMS	97.57	0.60	0.35	0.04	0.04	0.40	0.25	0.25	0.03	0.25	-	-	-	0.27
Triturado	98.56	0.80	0.20	0.02	0.03	0.02	0.05	0.05	0.02	0.25	-	-	-	-
HMS 1	99.52	-	0.03	0.03	0.03	0.02	0.20	0.15	0.03	-	-	-	-	-
HMS 2	98.52	-	0.03	0.03	0.03	0.02	0.20	0.15	0.03	-	-	-	-	1.00
P. interna	98.98	0.31	0.17	0.01	0.00	0.04	0.26	0.40	0.14	-	-	-	-	-
Triturado	99.68	-	0.03	0.01	0.03	0.02	0.12	0.10	0.02	-	-	-	-	-
HMS 1	93.80	0.66	0.22	0.02	0.04	0.16	0.11	0.07	0.03	0.16	0.30	0.08	1.00	-
HMS 2	95.60	0.60	0.22	0.02	0.05	0.13	0.15	0.05	0.01	0.11	0.20	0.20	0.80	1.00
Triturado	95.20	0.43	0.60	0.05	0.04	0.30	0.19	0.06	0.01	0.25	0.47	0.13	0.87	-
P. interna	95.60	0.65	0.58	0.02	0.02	0.20	0.08	0.08	0.02	0.08	0.02	0.01	0.60	-

²² EKMEKCI, Ismail; YETISKEN, Yasar y CAMDALI, Unal. Mass Balance Modeling For Electric Arc Furnance and Ladle Furnance System in Steelmaking Facility in Turkey. En: JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH INTERNATIONAL. China. 2007. Vol. 14, No. 5. p. 4.

²³ STEEL UNIVERSITY. Userguide for EAF simulation. Liverpool: The University of Liverpool, 2006. p.5.

²⁴ SEETHARAMAN, Seshadri. Treatise on process metallurgy. Industrial Processes, Part A. Walthman: ELSEVIER, 2014, p.277.

²⁵ Janke, D., *et al.* Scrap-based steel production and recycling of steel. En: Materials and Technology, 2000. Vol. 34, No. 6. p. 396.

Los materiales combustibles presentes durante el proceso de fabricación (hidrocarburos, aceites, grasas, etc.), además de componentes como mineral de hierro, fluidificadores (espato flúor, bauxita), elementos aleantes, ferroaleaciones son inconsecuentes para la simulación, por lo cual no fueron tomados en cuenta.

Las masas de las especies de entrada se calcularon a partir de la base de la carga de chatarra por una tonelada, de acuerdo con las proporciones necesarias para la producción de acero mediante formación de escoria espumosa. Por ende, se utilizaron los índices de consumo de carburante, de cal, de electrodos y de masas refractarias para un horno trifásico directo con revestimiento básico, estos se encuentran referenciados en ²⁶. Las cantidades de oxígeno 18.3 Nm³/ton (26.14 kg/ton) y carbón inyectado 17 kg/ton, pueden encontrarse en ^{27 28}.

La oxidación de la chatarra, debido al aire que ingresa al horno, se simuló añadiendo 2.1 Nm³ (3 kg/ton) a partir de los datos expresados en ²⁹, investigación que realiza una simulación de la oxidación en un horno de arco eléctrico. Asimismo, la composición de la cal fue tomada de ³⁰ y la de los refractarios básicos, los cuáles son los más usados en los hornos de arco eléctrico, se consideraron los de tipo

²⁶ ZAYURI, Lisette y RODRÍGUEZ, César. Implementación del proceso de formación de escoria espumosa en el horno eléctrico de arco trifásico directo, revestimiento básico de Acerías Paz del Río S.A. mediante el uso de una maquina inyectora. Trabajo de grado, Ingeniería Metalúrgica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías fisicoquímicas, 2005. p.33-37.

²⁷ DOCQUIER, Nicolas; GRANT, Michael y KAISER, Kennet. Ferrous Metals. En: BAUKAL, Charles. Oxygen-enhanced combustion. 2 ed. Boca Ratón: CRC Press, 2013. p.538.

²⁸ TOULOUEVSKI, Yuri y ZINORUV, Ilyaz. Electric Arc Furnance with Flat Bath, Achievements and Prospects. New York : Springer, 2015. p. 10.

²⁹ KHO, T.S., *et al.* Understanding stainless steelmaking through computational thermodynamics Part 1: electric arc furnance melting En: Mineral Processing and Extractive Metallurgy IMM Transactions section C, 2010. Vol. 119, No. 1. p. 5.

³⁰ SARSAM, Saad I; AL SAIDI, Aamal A y AL TAIE, Afaq H. Influence of Combined Stabilization on the Structural Properties of Subgrade Soil. En: Journal of Geotechnical Engineering, 2017. Vol. 4, No. 1. p. 16

dolomía, de acuerdo con ³¹. Por último, se tuvieron en cuenta las referencias ^{32 33 34} para las composiciones del carbón usado, el carbón inyectado y los electrodos respectivamente.

Tabla 2. Composición de las especies de entrada en la simulación

Fuentes de CaO	CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO
Cal	92.01	1.51	0.93	0.11	-
Refractario	54.5	2.75	3	3	36.8
Fuentes de carbono	C	S	P		
Carbón	98.45	0.5	0.05		
Carbón en polvo inyectado	89	0.6	-		
Electrodos de grafito	99.8	-	-		
Composición Aire	O₂	N₂	CO₂		
Aire (%Masa)	23.15	75.51	0.046		

3.1.2 Composición y distribución de las baterías

En búsqueda de evitar la separación manual o con diferentes equipos diseñados de las baterías, se investiga un proceso que permita reciclar o inertizar una mezcla de diferentes tipos de estas presentes en el mercado. La gráfica 1 muestra la distribución en peso de las baterías postconsumo típicas (n-PbA) por sistema electroquímico de acuerdo con ³⁵

³¹ ENRÍQUEZ, José, *et al.* Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte I, ACERÍA ELÉCTRICA. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Departamentos en E.U. de Arquitectura Técnica, 2009, p.109.

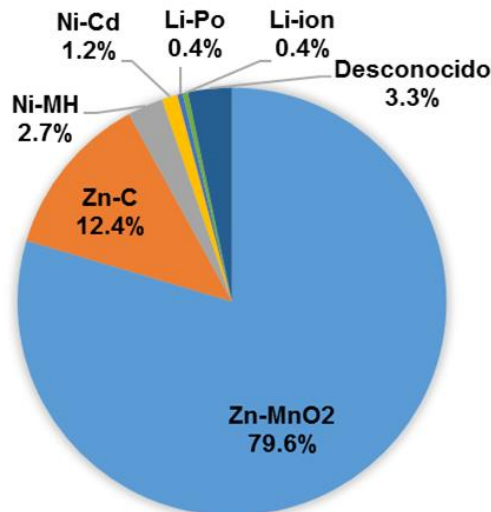
³² EKMEKCI, Ismail; YETISKEN, Yasar y CAMDALI, Unal, Op. Cit, p.4.

³³ IHOBE, Op. Cit, p. 45.

³⁴ Sadeli, Yunita; Wahyuadi, Johny y Prihandoko, Bambang. Study on Graphite Electric Arc Furnace Waste as a Bipolar Plate Composite Material for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) Application. En: Journal of Materials Science and Engineering , 2011. Vol. 1, No. B. p. 180.

³⁵ MOCCIA, Alberto., *et al.* Caracterización fisicoquímica de los materiales activos presentes en pilas gastadas del tipo Ni-Cd segregadas de un lote de pilas desechadas en la ciudad de Caracas. En: Avances en Química, 2015. Vol. 10, No. 1. p. 14.

Gráfica 1. Distribución en peso de las baterías postconsumo típicas (n-PbA) por sistema electroquímico



La composición utilizada de la mezcla de baterías se basó en las referencias ^{36 37 38} y se muestra en la siguiente tabla. Asimismo, se realiza la suposición que el plástico que contienen las baterías se compone de policloruro de vinilo (PVC) con el fin de simplificar las posibles composiciones de los empaques.

³⁶ VIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MATERIALES CIM, Op Cit, p.4.

³⁷ VAN SCHAİK, Antoinette y REUTER, Markus. Material-Centric (Aluminum and Copper) and Product-Centric (Cars, WEEE, TV, Lamps, Batteries, Catalysts) Recycling and DfR Rules. En: WORRELL, Ernst y REUTER, Markus. Handbook of recycling, State of the art for practitioners, analysts, and scientist. Ámsterdam: ELSEVIER, 2014. p.326.

³⁸FISHER, Karen., *et al.* Battery Waste Management Life Cycle Assessment. [En línea].Bélgica: European Portable Battery Association EPBA. 2006, p.55-56.

Tabla 3. Composición de la mezcla de baterías utilizada

	Zn-MnO ₂	Ni-MH	Ni-Cd	Li-ion	Li-Po	Zn-C	Composición usada
Fe	21.019	17.285	28.517	0.000	1.000	16.800	19.627
MnO₂	38.615	1.287	0.083	0.000	0.000	23.737	33.717
ZnO	21.360	1.503	0.303	0.000	-	24.148	20.041
C	5.018	2.766	3.836	15.559	-	10.071	5.426
Ni	0.005	13.647	9.369	0.574	2.000	0.000	0.495
Ni(OH)₂	-	19.587	27.534	-	-	-	0.665
Cu	0.000	0.000	0.072	11.950	16.000	-	0.113
Cd(OH)₂	-	-	23.502	-	-	-	0.282
LaNi₅	-	19.106	-	-	-	-	0.516
Li₂O	-	-	-	9.216	11.077	-	0.081
Co₃O₄	-	4.966	0.814	7.943	28.703	-	0.290
Al	0.000	0.000	0.000	5.736	15.000	-	0.083
Na	0.000	0.529	0.980	0.000	-	-	0.026
S	0.430	0.000	0.000	0.000	-	-	0.342
KOH	3.603	0.910	1.816	0.000	-	6.000	3.658
H₂O(g)	-	-	-	-	-	12.300	11.155
Cl(g)	2.271	2.157	2.555	22.140	1.703	2.271	2.273

3.1.3 Fases que constituyen los materiales del electrodo de las baterías

En las baterías alcalinas (Zn-MnO₂, Zn-C) la principal fase en la cual se encuentra el manganeso es MnO₂ y el zinc en la fase ZnO de acuerdo con ³⁹.

En las baterías de iones de litio y las de polímero de litio, que contienen litio y cobalto (Li-ion, Li-Po), la fase más prominente es LiCoO₂, tal como se menciona en ⁴⁰; debido a que esta fase no se encuentra disponible en la base de datos del software HSC Chemistry® 6.0 para ser simulada, se realiza la suposición de que se encuentra en las fases Li₂O y Co₃O₄, que si hacen parte de la base de datos.

³⁹ FERELLA, Francesco; DE MICHELIS, Ida y VEGLIÒ, Francesco. Process for the recycling of alkaline and zinc-carbon spent batteries. En: Journal of Power Sources, 2008. Vol 183, No.2. p.808.

⁴⁰ SHUVA, Al Hossaini, KURNY, A.S.W. Characterization Of Spent Lithium Ion Batteries In The Process Of Recovery Of Value Metals. En: Materials Science. An Indian Journal, 2013. Vol. 9, No. 10. p.389.

En cuanto a las fases presentes en las baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd), el cadmio se presenta en la fase $\text{Cd}(\text{OH})_2$ y el níquel se distribuye en 65% $\text{Ni}(\text{OH})_2$ y 35% Ni^0 , según la referencia ⁴¹.

Las baterías de níquel-metal hidruro (Ni-MH) presentan una aleación de tierras raras, en este caso se utilizó LaNi_5 junto con níquel en forma de hidróxido $\text{Ni}(\text{OH})_2$, el cual representa el 65% del níquel. La fracción restante, cerca del 35%, está en forma metálica tal como se menciona en ⁴¹.

3.2 EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN TERMODINÁMICA Y CÁLCULO DE BALANCE DE MASA

Con el fin de calcular el estado de equilibrio de las diversas reacciones que ocurren de manera simultánea durante el proceso de producción de acero en el horno de arco eléctrico, este último se analiza como un sistema multifásico y multicomponente, para lo cual, se utiliza el módulo de equilibrio GIBBS del software HSC Chemistry® 6.0 que se basa en el método de minimización de energía libre de Gibbs.

La energía libre de Gibbs en un sistema cerrado a una temperatura y una presión constante, disminuye para los cambios que ocurren espontáneamente ($dG < 0$), aumenta para aquellos cambios que son forzados ($dG > 0$) y no cambia para un sistema que está en equilibrio o los cambios son reversibles ($dG = 0$).

El programa requiere introducir las especies reactantes que ingresan al sistema y las que probablemente se generan, junto con sus coeficientes de actividad (para este modelo se asumen como el caso ideal, igual a la unidad); las masas de todas las especies que ingresan y las condiciones de temperatura y presión del sistema. Con esta información y una base de datos termodinámica, se determinan las cantidades de salida de los productos en equilibrio en dichas condiciones. Es

⁴¹ NOGUEIRA, Carlos y MARGARIDO, Fernanda. Battery Recycling by Hydrometallurgy: Evaluation of Simultaneous Treatment of Several Cell Systems. *En*: Salazar-Villalpando, Aria., *et al.* Energy technology 2012 : Carbon Dioxide Management and Other Technologies. 2012 ed. Pittsburgh: The Minerals, Metals & Materials society, 2012. p.231.

importante considerar que el análisis presentado se basa en el aspecto termodinámico y que las limitaciones cinéticas desempeñan un papel importante en el proceso de producción de acero en el horno de arco eléctrico.

Las especies, junto con sus masas en kilogramos ingresados en la simulación termodinámica del acero y, obtenidos a partir del balance de masa realizado en hojas de cálculo mediante Microsoft Excel®, se presentan en la tabla 4. A partir de la información mencionada, se realiza la primera simulación, en la cual HSC Chemistry entrega resultados de tres fases: los gases en el horno, aleación metálica y escoria.

Tabla 4. Datos de entrada para el programa HSC utilizado para simular el proceso de producción del acero

Especie química	Kg	Especie química	Kg
Fe	972.600	Zn	1.800
Mn	4.177	Fe ₂ O ₃	0.141
C	24.987	SiO ₂	3.980
P	0.275	Al ₂ O ₃	1.664
S	0.377	CaO	55.436
Si	1.690	O ₂ (g)	29.140
Cr	1.847	N ₂ (g)	9.785
Ni	1.343	CO(g)	0.000
Mo	0.268	CO ₂ (g)	0.006
Cu	1.392		

Se ejecuta una segunda simulación para obtener información de los polvos de acería y los gases de salida, se tiene en cuenta la formación de una serie de capas de óxido en la interface de metal escoria referida en⁴². Por otra parte, se toma en consideración que el mecanismo de formación de los polvos más importante es la

⁴² Da Silva, M.C., *et al.* Characterization Of electric arc furnace dust generated during plain carbon steel production. En: Ironmaking and Steelmaking, 2008. Vol. 35, No. 4. p.317.

formación de burbujas de CO en la superficie del metal según ⁴³, estas expulsan partículas de las capas de óxido y producen el material particulado. Por tanto, se realiza la suposición que los precursores de los polvos de acería son los óxidos presentes en las capas de la superficie del metal fundido, en la simulación se tuvieron en cuenta los óxidos ZnO, FeO, CaO, MnO, CaCO₃, los cuales se encuentran presentes en la base de datos termodinámicos del programa HSC. Finalmente, este proceso completa el primer modelo expresado en el apartado introductorio de la metodología experimental.

Este procedimiento se realiza de igual forma cuando se ejecutan simulaciones posteriores que tienen en cuenta la introducción de las baterías gastadas en sus respectivas fases y masas.

3.3 Evaluación del efecto en conjunto de la adición de baterías y elementos reductores

Con el objetivo de visualizar el impacto en conjunto de la adición de baterías y de los agentes reductores silicio (Si), aluminio (Al) y carbono (C) sobre las características del acero, se realizaron gráficas de contorno utilizando el paquete estadístico MINITAB 19 (Minitab Inc., Pennsylvania, USA). Las variaciones se basaron en un diseño experimental central compuesto (CCD) para 4 factores en 2 niveles. Por lo tanto, se realizaron 25 simulaciones. Las variables independientes estudiadas fueron: Baterías (1 – 10 % adicionado, respecto a una tonelada de chatarra), Silicio (0 – 5 Kg/Ton de chatarra), Aluminio (0 – 5 Kg/Ton de chatarra) y Carbono (0 – 5 Kg/Ton de chatarra). La tabla 5 muestra los valores evaluados en las simulaciones.

⁴³ GUÉZENNEC, Anne-Gwénaëlle., *et al.* Dust formation in Electric Arc Furnace : Birth of the particles. En: Powder Technology, 2005. Vol. 157, No. 1-3. p.5.

Tabla 5. Matriz de valores de porcentaje de baterías y agentes reductores Si, Al y C evaluados.

	Baterías	Al	C	Si
Simulación No.	(%)	(Kg/ton chatarra)	(Kg/ton chatarra)	(Kg/ton chatarra)
1	1	0	0	0
2	10	0	0	0
3	1	5	0	0
4	10	5	0	0
5	1	0	5	0
6	10	0	5	0
7	1	5	5	0
8	10	5	5	0
9	1	0	0	5
10	10	0	0	5
11	1	5	0	5
12	10	5	0	5
13	1	0	5	5
14	10	0	5	5
15	1	5	5	5
16	10	5	5	5
17	1	2.5	2.5	2.5
18	10	2.5	2.5	2.5
19	5.5	0	2.5	2.5
20	5.5	5	2.5	2.5
21	5.5	2.5	0	2.5
22	5.5	2.5	5	2.5
23	5.5	2.5	2.5	0
24	5.5	2.5	2.5	5
25	5.5	2.5	2.5	2.5

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La realización de las simulaciones termodinámicas tiene como objetivo conocer el comportamiento del horno de arco eléctrico durante el proceso de fabricación del acero bajo las condiciones mencionadas y, a partir de este, determinar el efecto de la incorporación de las especies químicas presentes en las baterías en las fases de escoria, polvo de acería, gas y de acero.

4.1 SIMULACIONES TERMODINÁMICAS Y BALANCES DE MASA

4.1.1 Simulación termodinámica bajo condiciones típicas de fabricación de acero en el horno de arco eléctrico.

Se realiza la simulación para el acero, bajo las condiciones mencionadas en el apartado 3.1. La temperatura utilizada en las simulaciones es de 1600°C de acuerdo con ⁴⁴ pues a esta se encuentran fundidas las materias primas. El término para referirse a este modelo será acero base en simulaciones posteriores. Las especies químicas no mencionadas se presentan en cantidades muy bajas cercanas a partes por millón (10^{-6}) o menores, por lo cual no se consideraron relevantes. A pesar de que el zinc metálico presente en la simulación se incluye como parte del acero, este es insoluble en él, según lo referido en ⁴⁵. A su vez, con la temperatura se volatiliza, lo cual produciría un mayor aporte a los polvos de acería.

⁴⁴ CADAVID, Gabriel, Op Cit, p.63.

⁴⁵ DAVIS, Boyd, JAVAID, Amjad y ESSADIQI, E. Final Report on Effect of Impurities in Steel. Canadá: Government of Canadá, 2006. p.13

Tabla 6. Composiciones resultantes del acero, escoria y polvo de la simulación termodinámica del acero base

Acero	Composición		Escoria	Composición		Polvo	Composición	
	Especie	%		Kg	Especie		%	Kg
Fe	99.496	959.116	CaO	59.995	54.145	ZnFe ₂ O ₄	68.091	17.008
Mn	0.055	0.527	FeO	19.206	17.334	Fe ₃ O ₄	30.945	7.730
C	0.023	0.219	SiO ₂	8.416	7.596	ZnO	0.800	0.200
P	0.000	0.000	MnO	5.191	4.685	Mn ₃ O ₄	0.164	0.041
S	0.006	0.056	Al ₂ O ₃	1.844	1.664			
Cr	0.094	0.908	Ca ₃ (PO ₄) ₂	1.526	1.377			
Ni	0.138	1.326	Cr ₂ O ₃	1.521	1.373			
Mo	0.028	0.267	MgO	1.440	1.299			
Cu	0.144	1.392	CaS	0.769	0.694			
Zn	0.017	0.161	MnS	0.038	0.034			
			Ni(OH) ₂	0.028	0.026			
			Fe ₃ O ₄	0.011	0.010			
			CaCO ₃	0.009	0.008			
			Fe ₂ O ₃	0.003	0.003			
			Ca ₂ P ₂ O ₇	0.001	0.000			
			FeSi	0.000	0.000			
			NiO	0.000	0.000			
			MoO ₂	0.000	0.000			

Validación del modelo

La cantidad de polvo de acería que genera la simulación es de 24.979 kg, lo cual concuerda de manera aproximada con los valores típicos que se presentan en ⁴⁶ ⁴⁷. Estas referencias expresan que entre 1 y 2% de la chatarra cargada en el horno de

⁴⁶ Da Silva, M.C, Op Cit, p.315.

⁴⁷ PICLES, C.A.. Thermodynamic modelling of the multiphase pyrometallurgical processing of electric arc furnace dust. En: Minerals Engineering, 2009. Vol. 22, No. 11. p.977.

arco eléctrico se convierte en polvo. En el modelo presentado solo se generan los gases de salida CO_2 y N_2 .

La composición del polvo que se genera en la simulación contiene principalmente ZnFe_2O_4 , ZnO , Mn_3O_4 , Fe_3O_4 . En general, según lo referido en ⁴⁸, el polvo de acería se compone principalmente de ZnFe_2O_4 , Fe_3O_4 , FeO , ZnO , junto con pequeñas cantidades de KCl , óxidos de Fe-Al-Ca-Zn-Mg , y trazas de Fe_2O_3 y varios silicatos. Por tanto, se considera que la composición obtenida es adecuada.

De acuerdo con ⁴⁹, generalmente el 16,2% de la chatarra se convierte en escoria durante el proceso. Al tener en cuenta este porcentaje, la cantidad correspondiente para la simulación presentada sería 162 kg; sin embargo, la cantidad reportada de escoria es de 90.401 kg. Esta diferencia puede deberse a factores cinéticos que no se tuvieron en cuenta con el objetivo de reducir la complejidad de la simulación.

Al analizar algunos de los principales óxidos presentes en la composición de la escoria FeO , MnO , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , estos coinciden con los rangos presentados en ⁵⁰ para la composición química típica de la escoria de horno de arco eléctrico. A continuación, se muestra la tabla comparativa de los datos.

⁴⁸ RIZEZCU, Cristiana- Zizi., *et al.* Characterization of Steel Mill Electric-Arc Furnace Dust. En: KALLEL, Ali., *et al.* Advances in waste management. Tunisia : WSEAS Press, 2010. p. 140.

⁴⁹ PARRA, Lina y SÁNCHEZ, Diana. Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco, municipio Tuta-Boyacá. Trabajo de grado, Ingeniería ambiental y sanitaria. Bogotá: Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería, 2010. p.48.

⁵⁰ ESFAHANI, Shaghayegh. Crystallization of Synthetic Blast Furnace Slags Pertaining to Heat Recovery. A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Toronto: University of Toronto. Materials Science and Engineering, 2016. p. 5.

Tabla 7. Comparación de la composición química de la escoria de horno de arco eléctrico simulada junto con el rango de composición típica

	%	Rango referencia [%]
FeO	19.21	15-30
MnO	5.19	1-8
SiO ₂	8.42	9-20
Al ₂ O ₃	1.84	2-9
CaO	60.02	35-60
MgO	1.44	5-15

Se puede considerar que la escoria mostrada en la simulación del acero base presenta una composición típica; sin embargo, el MgO está por debajo del rango, esto puede deberse a que, en la referencia utilizada para la comparación, las interacciones entre la escoria y el revestimiento generan un mayor desgaste que el considerado en la simulación.

4.1.2 Simulación termodinámica de fabricación de acero base en el horno de arco eléctrico junto con una mezcla típica de 1% de baterías.

Se realiza la simulación del proceso en iguales condiciones a la simulación de acero base, pero se incluye 1% de la mezcla de diferentes baterías posconsumo con la composición mencionada en la sección 3.1, respecto a la carga de chatarra de una tonelada. Este porcentaje de baterías ha sido exitosamente reciclado mediante el horno de arco eléctrico, aunque exclusivamente de baterías alcalinas según ⁵¹. Sin embargo, no se encontraron investigaciones en las que se procesen una mezcla de diferentes tipos de baterías. Con base en lo descrito anteriormente, se obtienen los siguientes resultados.

⁵¹ PISTOIA, G; WIAUX, J.-P. y WOLSKY, S.P., Op Cit, p.212.

Tabla 8. Composiciones resultantes del acero, escoria y polvo de la simulación termodinámica de fabricación de acero base en el horno de arco eléctrico junto con una mezcla típica de 1% de baterías.

Acero	Composición		Escoria	Composición		Polvo	Composición	
	Especie	%		Kg	Especie		%	Kg
Fe	99.447	960.010	CaO	57.456	54.113	ZnFe ₂ O ₄	89.407	29.358
Mn	0.077	0.745	FeO	19.826	18.672	Fe ₃ O ₄	3.840	1.261
C	0.022	0.210	SiO ₂	8.065	7.596	ZnO	3.737	1.227
P	0.000	0.000	MnO	7.578	7.137	KCl	1.480	0.486
S	0.007	0.064	Al ₂ O ₃	1.783	1.680	ZnCl ₂	0.731	0.240
Si	0.000	0.000	Cr ₂ O ₃	1.527	1.438	Cd(OH) ₂	0.411	0.135
Cr	0.089	0.863	Ca ₃ (PO ₄) ₂	1.462	1.377	Mn ₃ O ₄	0.360	0.118
Ni	0.151	1.461	MgO	1.380	1.299	NaCl	0.018	0.006
Mo	0.028	0.267	CaS	0.781	0.736	La ₂ O ₃	0.014	0.005
Cu	0.145	1.403	MnS	0.059	0.056	CdO	0.001	0.000
Al	0.000	0.000	Ni(OH) ₂	0.033	0.031			
Zn	0.031	0.297	La ₂ O ₃	0.020	0.019			
Cd	0.000	0.001	Fe ₃ O ₄	0.013	0.012			
Li	0.000	0.003	CaCO ₃	0.009	0.008			
Na	0.000	0.000	Fe ₂ O ₃	0.004	0.004			
Co	0.002	0.021	Li ₂ O	0.003	0.003			
			Ca ₂ P ₂ O ₇	0.001	0.001			
			FeSi	0.000	0.000			
			NiO	0.000	0.000			
			MoO ₂	0.000	0.000			

Efecto de la mezcla de baterías en los polvos de acería

En el horno el contenido de zinc, cadmio y parte del lantano, provenientes de las baterías, tienen la tendencia a convertirse en gases para después condensarse como material particulado en forma de óxidos y otros compuestos, lo cual incrementa en un 31.455% (7.857Kg) el polvo de acería.

Los gases y material particulado generados son recogidos mediante los sistemas de control de emisiones presentes en el mismo horno, estos últimos deben estar

presentes en los hornos de acuerdo con las normas de emisión de fuentes fijas. En el modelo presentado solo se generan los gases de salida CO₂, N₂ y vapor de agua proveniente de las baterías.

El contenido de óxido de zinc presente en las baterías alcalinas, que representan aproximadamente el 80% de la carga de baterías, se reduce carbotérmicamente por encima de 935 °C a una atmósfera de presión según ⁵². Entonces, de acuerdo con ⁵³ el óxido de zinc se reduce en contacto directo con el carbón como se muestra en la reacción (1) y en contacto con CO(g) a 1350 °C según la reacción (2). Por último, el zinc se evapora y es reoxidado al entrar en contacto con el aire como se observa en la ecuación (3).



Al considerar las cantidades de carbono ingresado en el modelo del acero base, el porcentaje de carbono presente en los empaques plásticos y el carbono presente en las baterías en forma de grafito pueden usarse para la reducción de metales. El zinc en forma metálica se incrementa en un 85.086% (0.137Kg) y finalmente resulta condensado en los polvos.

La adición de baterías al proceso de producción de acero disminuye el costo de tratamiento del polvo de acería y hace que sea más rentable el proceso de extracción de zinc, ya que se aumenta considerablemente con la adición de baterías en un 87.46%. Otros elementos volátiles como mercurio y plomo se pueden

⁵² ELLIS, T.W. y MIRZA, A.H. Battery Recycling: Defining the market and identifying the technology required to keep high value materials in the economy and out of the waste dump. [En línea]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology. 2006.

⁵³ SÁNCHEZ-ALVARADO, Ricardo y FRIEDRICH, Bernd. Optimisation of the FeMn and ZnO Production from Spent Pyrolised Primary Batteries – Feasibility of a DC-Submerged Arc Furnace Process. En: World of Metallurgy – ERZMETALL, 2008. Vol 61, No. 4, p. 257-258.

presentar en algunos tipos específicos de baterías, pero actualmente las baterías se fabrican sin estos elementos como se evidencia en ⁵⁴ por tanto, no se tienen en cuenta en el modelo presentado.

El policloruro de vinilo (PVC) de las baterías aporta cloro para generar KCl, ZnCl₂, NaCl, los cuales son compuestos comúnmente hallados en los polvos. Al tener en cuenta que el punto de ebullición del cadmio es 767 °C, el que está presente en las baterías Ni-Cd se evapora y se condensa en los polvos de acería, principalmente como Cd(OH)₂ en una cantidad de 0.135kg. La presencia del cadmio puede ser un limitante del ingreso de baterías, ya que este contribuye a la clasificación como residuo peligroso del polvo de acería.

La adición de sodio (Na) presente en las baterías Ni-MH y Ni-Cd puede generar Na₂CO₃, el cual descompone la ferrita de zinc (ZnFe₂O₄) y promueve la transferencia del zinc a la forma óxido de zinc (ZnO) según ⁵⁵. Por ende, se puede considerar que la presencia de sodio en este tipo de baterías puede beneficiar la extracción de zinc del polvo de acería.

Efecto de la mezcla de baterías en la escoria

La adición de la mezcla de baterías tiene el efecto de incrementar la escoria en un 4.373%(3.911Kg). El MnO₂ proveniente de las baterías alcalinas se reduce para hacer parte del acero como Mn, de acuerdo con las ecuaciones 4,5,6 ⁵³ y se incrementa en 41.530%(0.219Kg) respecto al acero base. Parte del Mn pasa a la escoria como MnO con un aumento de 52.329%(2.452 Kg). Por último, parte del Mn se va al polvo en forma de Mn₃O₄ y se incrementa en un 188.185%(0.077) respecto a la cantidad presentada en el polvo del acero base.

⁵⁴ BERNARDES, Andrea; ESPINOSA, Denise y TENORIO, Jorge. Op Cit, p.291.

⁵⁵ RYAZANOV, A.G; SENIN, A.V. y KHMELEVA, O.V. Zinc Ferrite Decomposition by Sodium Carbonate and Calcium Oxide at Roasting of Steelmaking Dust. En: Materials Science Forum, 2019. Vol. 946. p.478.

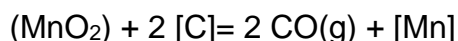
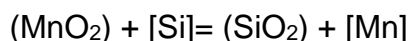
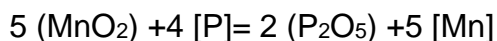
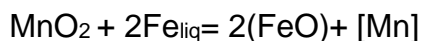


Por otra parte, la inclusión de baterías permite la reducción del uso de ferromanganeso y, al mismo tiempo, disminuye el impacto contaminante que implica la producción de esta ferroaleación.

El manganeso que no logra ser reducido durante el proceso y que resulta en la escoria (87.2%) puede valorizarla al usarse como sustituto del mineral de manganeso o como fuente de manganeso en otros procesos.

En los hornos con refractarios de carbón alúmina se presenta un efecto negativo del manganeso, este genera que la viscosidad de la escoria se disminuya y se aumente su fluidez, lo cual puede incrementar la erosión y el socavado del refractario ⁵⁶.

Si se introducen las baterías bajo condiciones oxidantes, el oxígeno del dióxido de manganeso puede oxidar los elementos químicos de la carga, lo cual disminuye las impurezas presentes y provoca la reducción del manganeso de acuerdo con las reacciones expresadas en ⁵⁷.



⁵⁶ ZUO, H.-B., *et al.* Effects of MnO on slag viscosity and wetting behaviour between slag and refractory. En: *Ironmaking & Steelmaking*, 2015. Vol 43, No 1. p. 1.

⁵⁷ NAVAS, Efraín y BATISTA, Aerles. utilización del mineral de manganeso (pirolusita) en la producción de aceros al carbono. En: *Minería & Geología*, 2003. Vol. 19, No. 3-4, p. 74-75

En la escoria se presentan 0.003 Kilogramos de óxido Li_2O proveniente de las baterías de ion de litio y polímero de litio (Li-ion, Li-Po), el níquel proveniente de las baterías Ni-MH y Ni-Cd se presenta en la escoria como la especie $\text{Ni}(\text{OH})_2$, lo cual genera que se incremente 0.006Kg (23.139%).

Efecto de las baterías en el acero

Las baterías presentan metales como hierro, manganeso, níquel, cobalto, cobre que, de acuerdo con el grado del acero a fabricar, pueden ser un elemento de aleación o un elemento residual.

El manganeso presente en las baterías alcalinas es un elemento aleante y se distribuye en un 11.8% en el acero. A altas temperaturas, el manganeso tiende a reaccionar fuertemente con oxígeno, azufre y fósforo según ⁵⁸, esto genera la oxidación del fósforo y la formación de sulfuro de manganeso, debido a que el azufre tiene mayor afinidad con el manganeso que con el hierro como se menciona en ⁵⁹. Por tanto, el principal efecto de la adición de manganeso en las aleaciones ferrosas es la de neutralizar el efecto nocivo del azufre y del fósforo; en la simulación, el MnS aumenta en un 61.557%, lo cual favorece las propiedades mecánicas. Como elemento aleante en el acero, el manganeso mejora la resistencia a la tracción, dureza, templabilidad y tenacidad ⁶⁰.

El metal de tierras raras presente en las baterías de níquel metal hidruro (Ni-MH), que para este modelo fue el lantano, tiene la tendencia a oxidarse completamente y se va a la escoria como La_2O_3 en una cantidad de 0.019Kg; de esta manera, el

⁵⁸ NDLOVU, Sehliselo; SIMATE, Geoffrey S. y MATINDE, Elias, Op Cit, p.244

⁵⁹ Conference : IV International Symposium on Chemistry. "Effect of copper in the Cu -Si- Mn cast iron alloying system." (1-4, JUNIO, 2010: Santa Clara, Cuba). Análisis del efecto de la adición de cobre, manganeso y el silicio en un hierro fundido empleando un diseño de experimentos en regiones restringidas. 2010, p.2

⁶⁰BOROVSKÝ, T., *et al.* The influence of slag composition on the distribution of manganese between slag and metal in the electric arc furnace. En: Acta Metallurgica Slovaca, 2012. Vol. 18, No. 1, p. 28.

metal se pierde. De acuerdo con ⁶¹, este comportamiento es común para un proceso de reciclaje pirometalúrgico de este tipo de baterías.

El cobalto presente en las baterías se dirige al baño metálico prácticamente en su totalidad; por lo cual, puede ser usado como elemento de aleación. Este metal es añadido para aumentar la resistencia y la dureza, disminuir la templabilidad y mejorar la dureza en caliente como se afirma en ⁶².

En la simulación el cobre no se oxida y tiene la tendencia de ir al acero, por lo cual, este puede ser uno de los factores limitantes del ingreso de baterías, ya que el cobre reduce las propiedades mecánicas (ductilidad) del acero, este efecto puede ser prevenido con adiciones similares de níquel como se expresa en ⁶³. La cantidad de cobre que incrementa en la aleación al adicionar un 1% de baterías es de 0.011Kg (0.808%) y el incremento de níquel es de 0.135Kg (10.188%); por lo tanto, el efecto negativo del cobre presente en las baterías es compensado con adición del níquel presente en las baterías de manera simultánea. El níquel se distribuye en un 98.6% en el acero y tiene el efecto de mejorar la resistencia a la corrosión, aumentar la templabilidad del acero y estabilizar la austenita en acero inoxidable como Davis *et al.* afirman en ⁶⁴.

4.1.3 Simulaciones termodinámicas de la inclusión de un mayor porcentaje de baterías

Con el fin de incrementar un determinado metal presente en la aleación y obtener una composición química específica, se hace necesario aumentar la cantidad de baterías. A continuación, se ilustra el efecto de la incorporación de un mayor

⁶¹ ESPINOSA, Denise y BORGES, Marcelo. Op Cit, p. 377

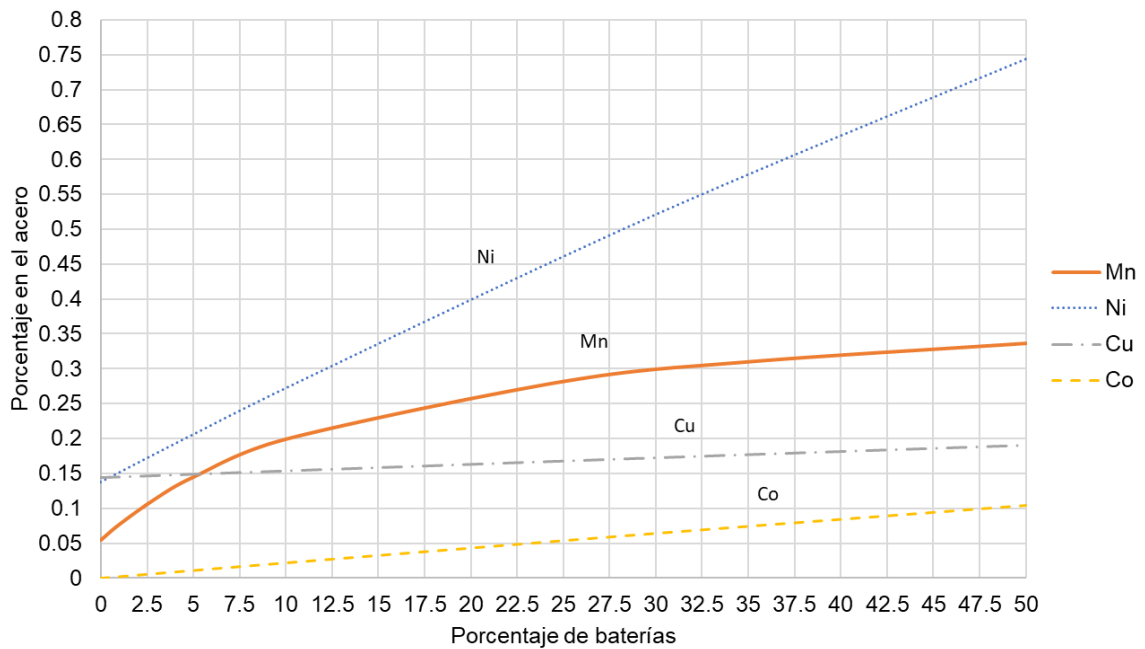
⁶² BRAMFITT, Brice y BENSCOTER, Arlan. Metallographer's Guide. Practices and procedures for Irons and Steels. Ohio:ASM INTERNATIONAL, 2002. p.3.

⁶³ MINTZ, B.; ABUSHOSHA, R. y CROWTHER, D. N. Influence of small additions of copper and nickel on hot ductility of steels. En: Materials Science and Technology, 1995. Vol 11, No. 5, p. 479-480.

⁶⁴ DAVIS, Boyd, JAVAID, Amjad y ESSADIQI, E. Op Cit, p.9

porcentaje de baterías sobre la cantidad de metal presente en el acero, bajo las condiciones expresadas en el apartado 3.1. respecto a la carga de chatarra de una tonelada.

Gráfica 2. Efecto de la incorporación de un mayor porcentaje de baterías sobre la cantidad de metal presente en el acero



Se observa un incremento en los metales manganeso, cobalto y níquel; así mismo, a mayor porcentaje de baterías, se evidencia el incremento en el cobre, lo cual puede afectar de manera negativa el acero.

4.1.4 Simulaciones termodinámicas de la inclusión de elementos reductores a la simulación acero base con una mezcla típica de 1% de baterías

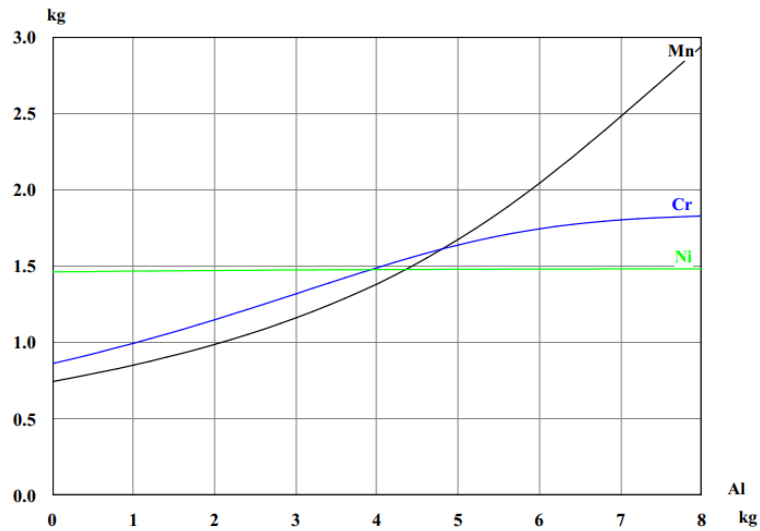
Con el objetivo de incrementar en la aleación los metales presentes en la batería, sin aumentar el porcentaje de baterías ingresado, se pueden introducir, junto a la carga de baterías, elementos que sirvan de agentes reductores, los cuales también pueden reducir otros metales en la carga metálica.

Al considerar las baterías como un mineral que contiene los metales de manganeso, níquel y zinc, se puede comparar con investigaciones como ^{57 65} en las cuales se introduce mineral de manganeso en el horno de arco eléctrico para reemplazar el uso del ferromanganeso, en estas se utiliza como agentes reductores desechos de aluminio y carbono. Para observar el efecto de los agentes reductores, se incluyen a la simulación del acero base con 1% de baterías y se obtienen las siguientes gráficas.

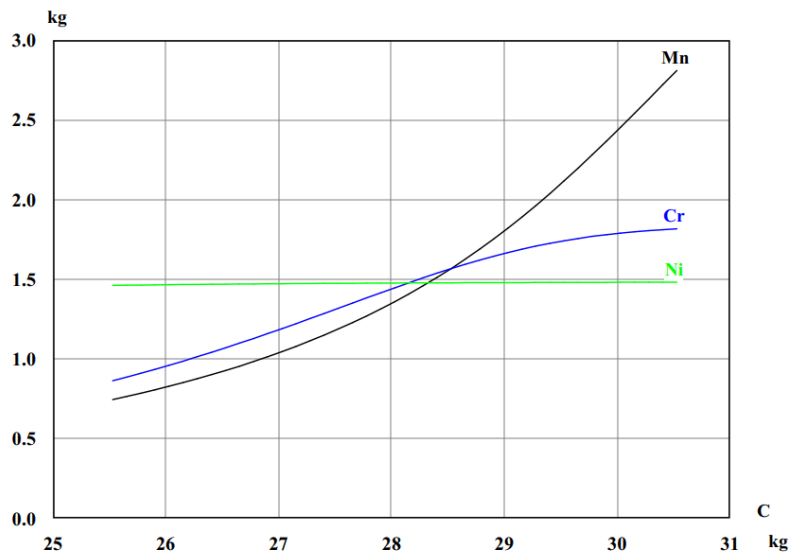
⁶⁵ Navas, E.E; Arzola, J. y Batista, A. Producción de aceros al carbono en hornos de arco eléctrico en condiciones de mineral de manganeso. En: Ingeniería Mecánica, 2007. Vol. 10, No. 2, p. 23-31

El aluminio y carbono tienen una mayor afinidad química hacia el oxígeno, por lo cual puede ser usado como reductor de los óxidos metálicos presentes en las baterías.

Gráfica 3. Efecto del aluminio como reductor en la simulación del acero base con 1% de baterías

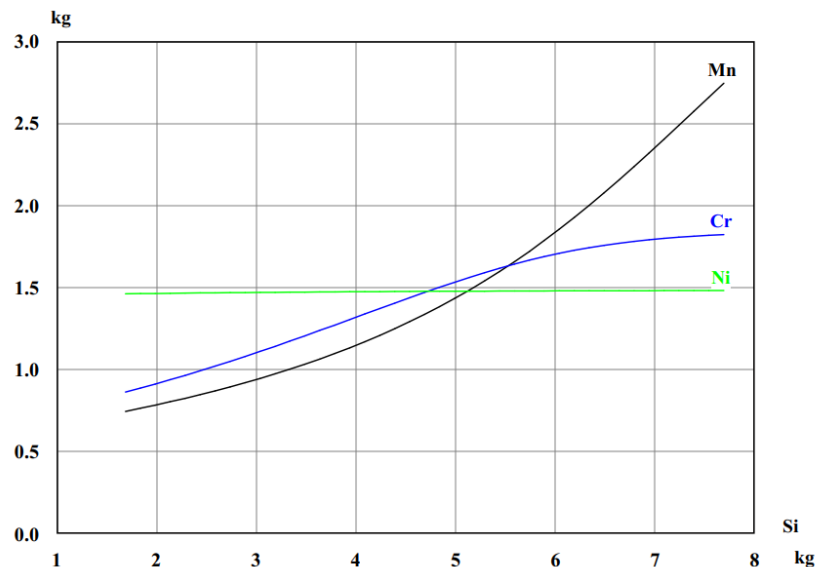


Gráfica 4. Efecto del carbono como reductor en la simulación del acero base con 1% de baterías



De acuerdo con la investigación realizada por Blanpain *et al.* ⁶⁶, las adiciones de ferrosilicio permiten la reducción eficaz de los óxidos de cromo de la escoria, por lo cual podría utilizarse esta aleación para reducir otros óxidos metálicos de la escoria y mejorar la recuperación de los metales. En esta misma investigación se afirma que es necesario utilizar silicio para modelar el ferrosilicio, por lo cual fue realizado de esta manera.

Gráfica 5. Efecto del Silicio presente en el ferrosilicio como reductor en la simulación del acero base con 1% de baterías.



Se observa que el manganeso y el níquel presentes en las baterías son efectivamente reducidos por los agentes reductores investigados; asimismo, estos pueden afectar a otros elementos presentes en la carga de chatarra como el cromo.

⁶⁶ SARSAM, Saad I; AL SAIDI, Aamal A y AL TAIE, Afaq H. Op Cit, p.1.

4.2 EVALUACIÓN DE LA ADICIÓN DE BATERÍAS Y DE AGENTES REDUCTORES

Los modelos respuesta fueron usados para generar superficies de contorno presentados en las gráficas 6, 7, 8 Y 9.

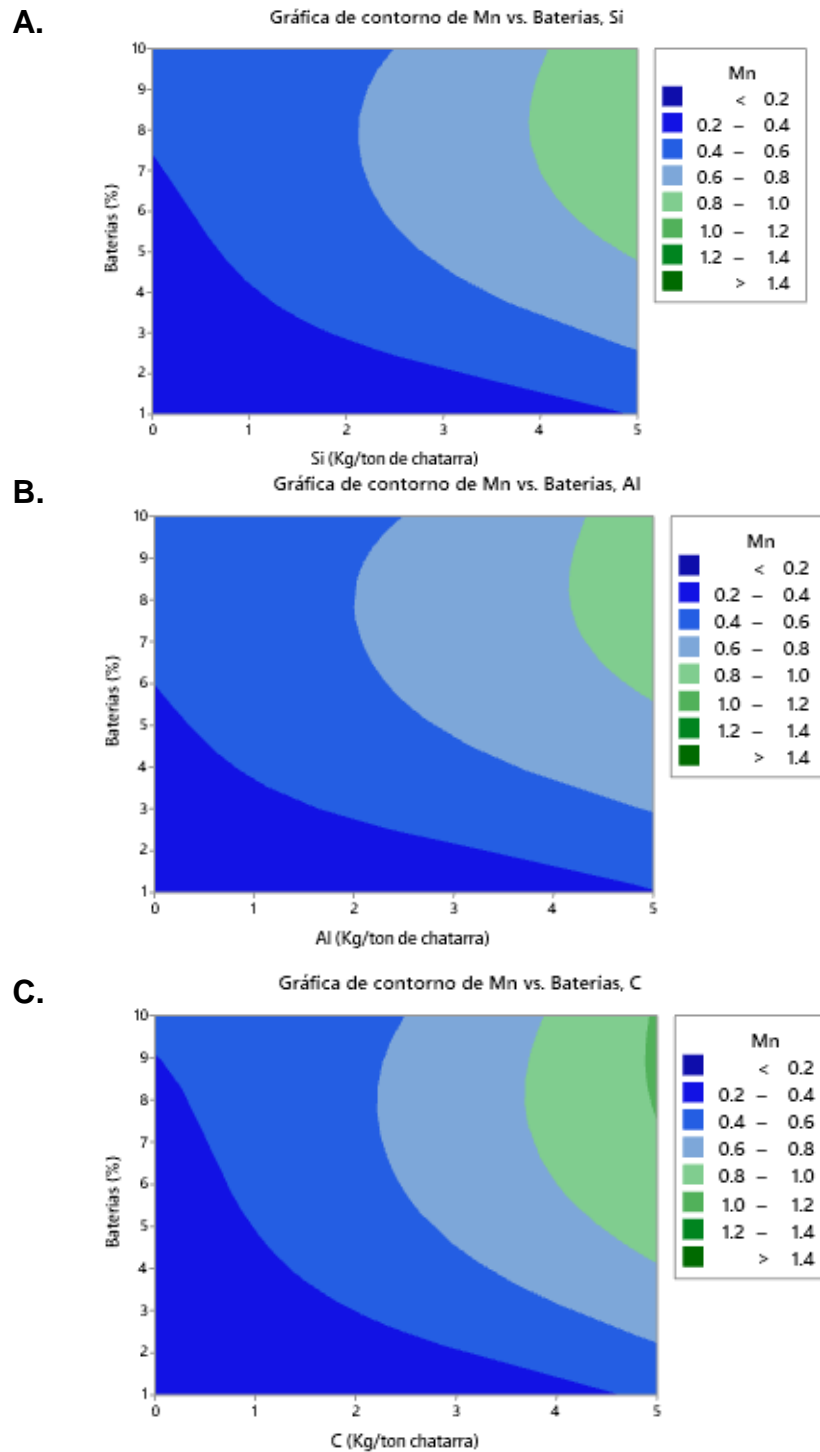
4.2.1 Niveles de manganeso en el acero.

Al evaluar el efecto de la adición de baterías junto con reductores Si, Al y C en la simulación del acero base se observa, de manera general, que el incremento en agentes reductores conlleva a un incremento en la cantidad de manganeso en el acero resultante. Normalmente, los efectos de Si, Al o C tienen la tendencia a comportarse de manera similar. Las líneas de contorno de las superficies de Mn se presentan en la gráfica 6 A, B y C. En las gráficas se evidencia que las mezclas con porcentajes mayores que 4% de baterías y mayores que 4Kg del agente reductor/tonelada de chatarra permiten llegar a niveles más altos de Mn (0.8 – 1.0 %). Asimismo, dentro de casi todo el rango de porcentaje de baterías evaluado (1-10%) los incrementos menores de ± 2 Kg del agente reductor/tonelada de chatarra permiten que el manganeso se mantenga en rangos menores que 0.6%.

4.2.2 Niveles de carbono en el acero.

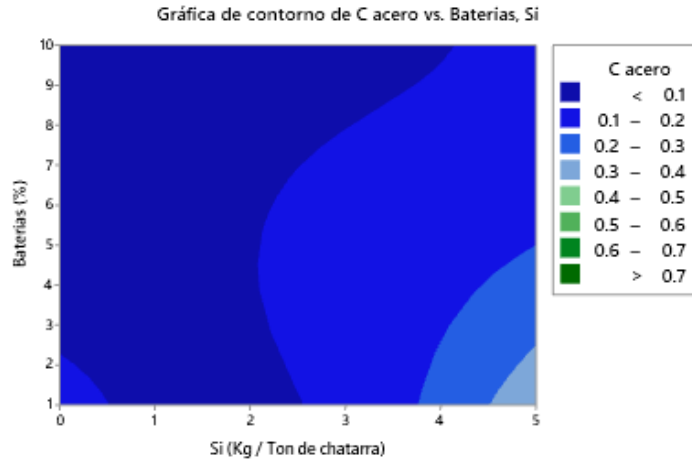
En relación con el nivel de carbono en el acero, se encuentra que al adicionar C o Al se producen aceros con un porcentaje menor a 0.22%. En valores menores que 1 Kg de Al/t de chatarra y menores a 3% de baterías, se genera un leve aumento en la cantidad de carbono en el acero, este mismo incremento sucede al ingresar cantidades mayores que 2.5 Kg de Al/t de chatarra y se presenta en rangos entre 0.1- 0.22 %. Por otro lado, una cantidad mayor que 3 Kg Si/t de chatarra muestra niveles de C en acero entre 0.2% y 0.4%. Estas líneas de contorno se presentan en la gráfica 7 A, B y C.

Gráfica 6. Gráficas de contorno para el Manganeso en el acero en función de la adición de A. % de baterías y FeSi. B. % de baterías y aluminio. C.% de baterías y Carbono.

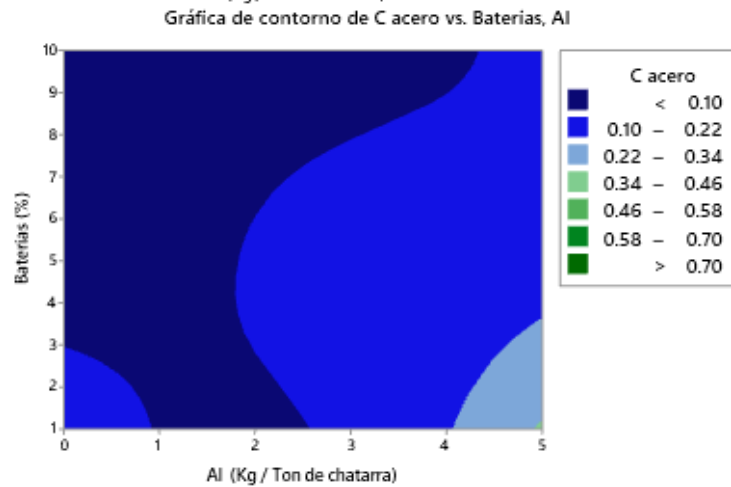


Gráfica 7. Gráficas de contorno para el Carbono en el acero en función de la adición de A. % de baterías y FeSi. B. % de baterías y Aluminio. C. % de baterías y Carbono.

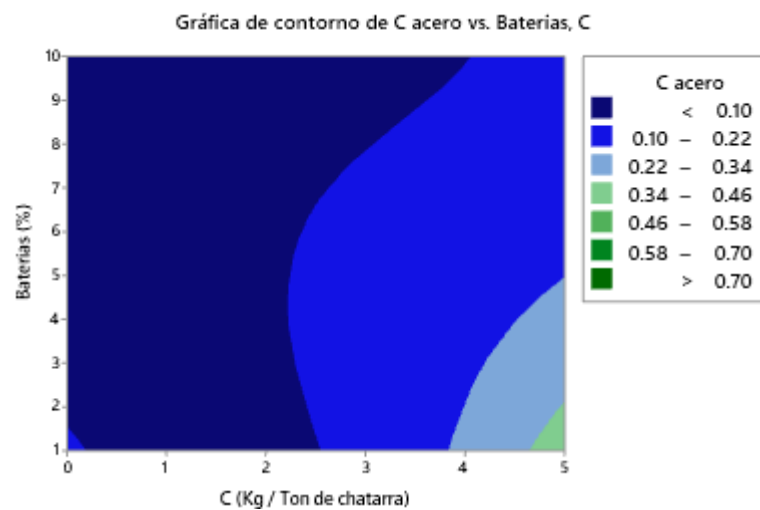
A.



B.



C.



Niveles de cobre en el acero

El porcentaje de cobre en el acero está principalmente influenciado por la cantidad de baterías. A mayor cantidad de baterías, mayor cantidad de cobre. La adición de agentes reductores no muestra un efecto significativo en la cantidad de cobre, esto se debe a que este elemento tiene la tendencia a no oxidarse, pues el hierro tiene mayor predisposición a la oxidación que el cobre ⁶⁷. Como se observa en las gráficas 8 A, B y C, todas las superficies de contorno presentan rangos muy similares. De acuerdo con las simulaciones efectuadas, se observa que la cantidad de Cu se mantiene en 0.142% y 0.152%, este rango es aceptable si se tiene en cuenta que la Norma NTC 243 para el acero SAE 1020 exige valores menores a 0.35%. En consecuencia, la adición de baterías entre 1 – 10%, respecto a la carga de chatarra, parece ser adecuada en términos de la cantidad de cobre en el acero.

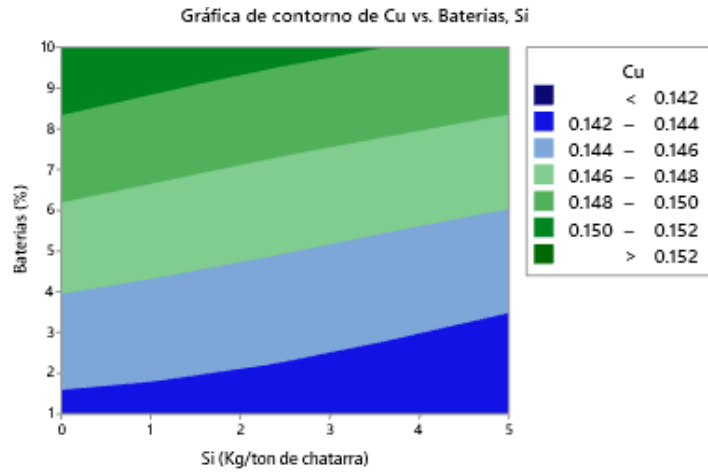
Niveles de níquel en el acero

En cuanto a la cantidad de níquel, se observa que las superficies de contorno presentan comportamientos muy similares para todos los agentes reductores evaluados, como se muestra en las gráficas 9 A, B y C. No se percibe que el Si, Al o C tengan un efecto directo en la cantidad de níquel en el acero, pues las baterías tienden a ser el único factor que incrementa el porcentaje de níquel. En valores de menos de 8% de baterías agregadas, se observan valores de níquel menores de 0.25%, lo cual corresponde con el valor máximo exigido para el Acero SAE 1020 en la Norma NTC 243.

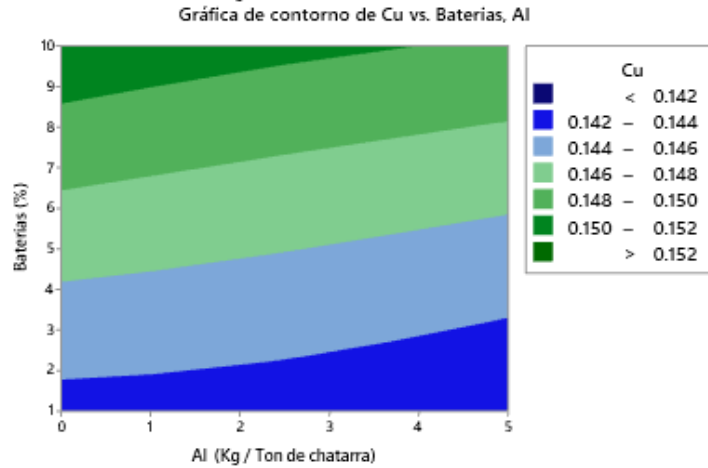
⁶⁷ DAEHN, Katrin; CABRERA, André y ALLWOOD, J. Finding the Most Efficient Way to Remove Residual Copper from Steel Scrap. En: Metallurgical and Materials Transactions B, 2019. Vol. 50, No. 3. p. 1227.

Gráfica 8. Gráficas de contorno para el Cobre en el acero en función de la adición de A. % de baterías y FeSi. B. % de baterías y Aluminio. C. % de baterías y Carbono

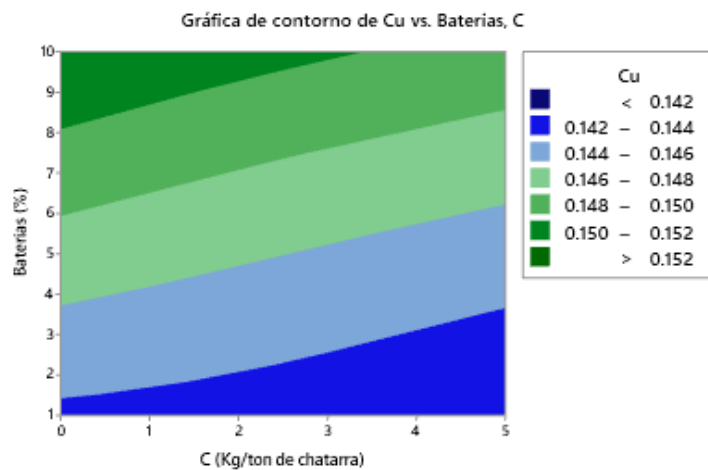
A.



B.

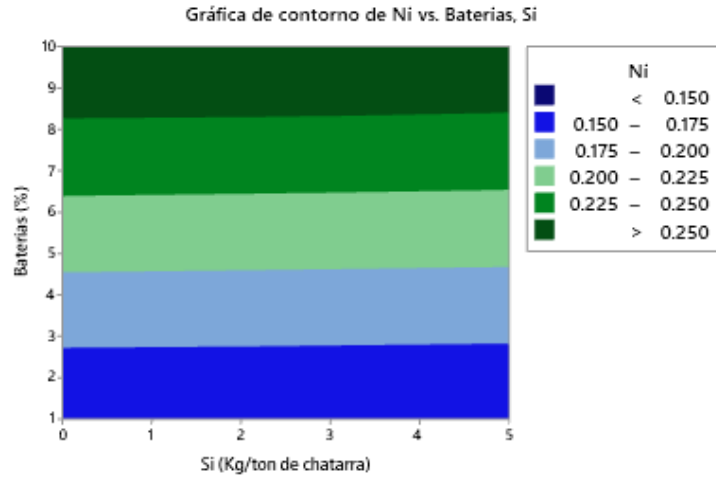


C.

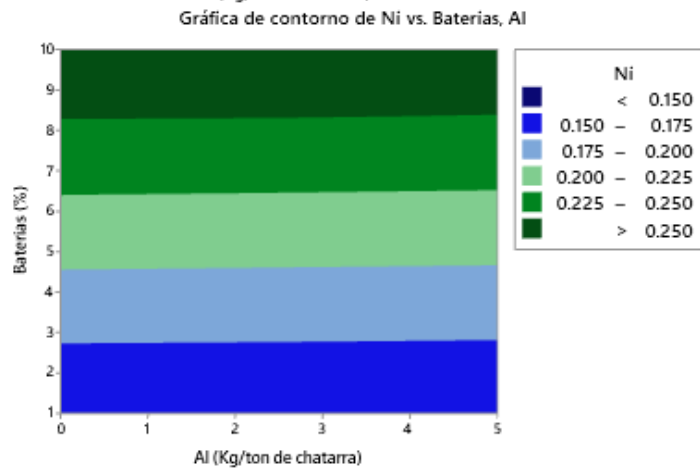


Gráfica 9. Gráficas de contorno para el Níquel en el acero en función de la adición de A. % de baterías y FeSi. B. % de baterías y Aluminio. C. % de baterías y Carbono

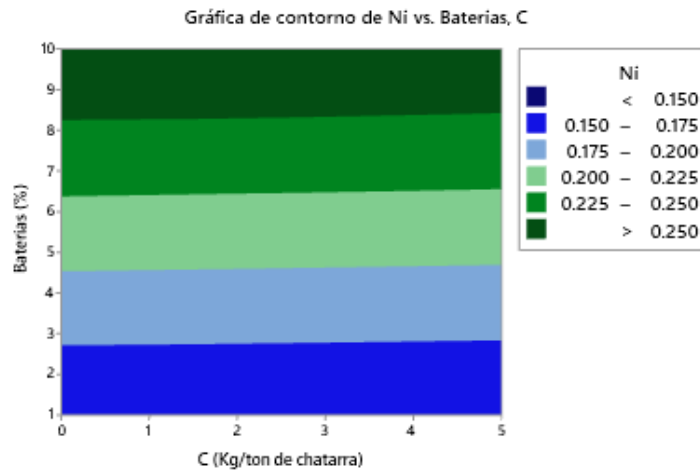
A.



B.



C.



4.2.3 Optimización de la cantidad de baterías y de agentes reductores.

Para las simulaciones de las aleaciones se pretende encontrar los valores de ciertas condiciones, las cuales se logran haciendo uso de los metales presentes en las baterías gastadas y los elementos reductores adicionados. Los requerimientos de composición química referidos seleccionados fueron el acero SAE 1020 presentado por la norma técnica colombiana NTC 243 (composiciones químicas de colada para aceros al carbono)²⁰ y para los aceros de barras corrugadas y lisas, de acuerdo con la norma técnica Colombia NTC 2289 (barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación, para refuerzo de concreto)²¹. La Tabla 9 muestra los requerimientos de las normas para Mn, C, Cu y Ni de dichas normas.

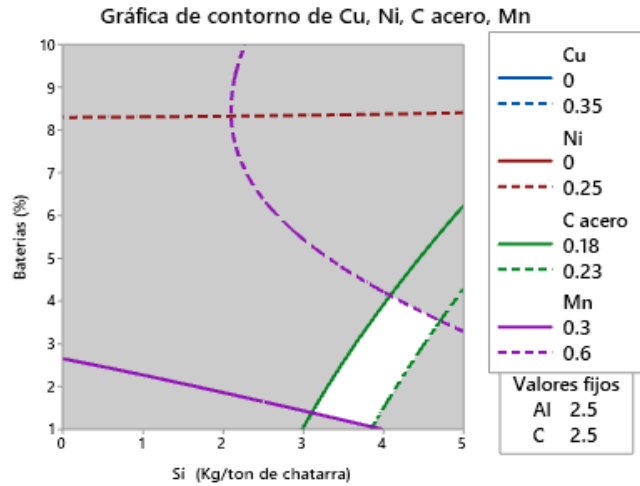
Tabla 9. Valores de Mn, C, Cu y Ni en acero SAE 1020 (Norma NTC 243) y barras corrugadas y lisas de acero (Norma NTC 2289).

Elemento	Acero SAE 1020 Norma NTC 243	Barras Norma NTC 2289
Manganeso (Mn)	0.30 – 0.60%	< 1.50 %
Carbono (C)	0.18 – 0.23%	< 0.30 %
Cobre (Cu)	< 0.35%	--
Níquel (Ni)	<0.25%	--

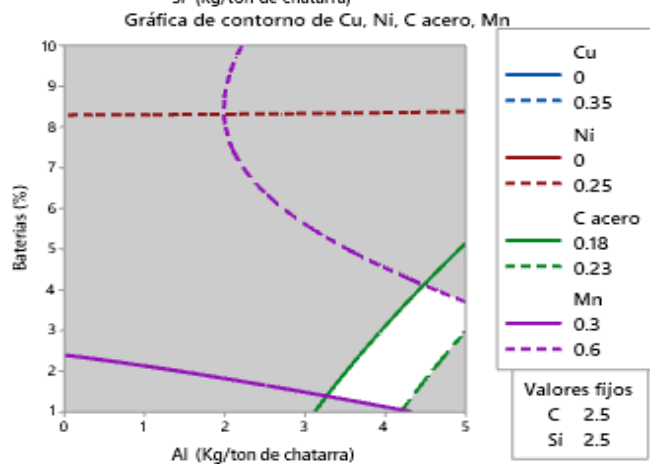
A partir de dichas condiciones se procedió a identificar diferentes combinaciones de porcentajes de baterías, Si, Al y C que optimizaran los valores de Mn, C, Cu y Ni, con el fin de obtener un acero que cumpla con la norma NTC 243. Al superponer las superficies de contorno presentadas en las gráficas 6, 7, 8 Y 9 y restringir los valores de Mn, C, Cu y Ni, como se presenta en la tabla 9, es posible encontrar áreas donde se cumplan los requerimientos de la norma.

Gráfica 10. Superposición de las gráficas de contorno con variación de A. FeSi B. Al y C. C. Los valores de las demás variables de agentes reductores se mantuvieron constantes en 2.5Kg /ton de chatarra

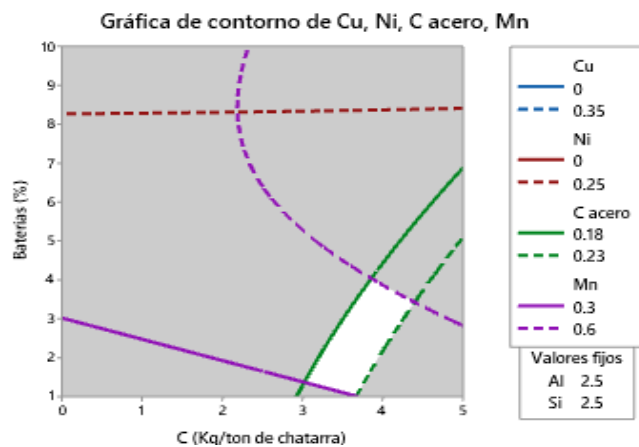
A.



B.



C.



Adicionalmente, se decidió realizar una optimización de las condiciones de porcentajes de baterías, Si, Al y C para obtener los máximos y mínimos establecidos en la norma para Mn y C en el acero.

Tabla 10. Optimización de condiciones para alcanzar los valores medios, límites máximos y mínimos de la norma NTC 243 para Mn y C en acero

Valores objetivo en acero SAE 1020		% de Baterías	Si	Al	C	Optimización Hoja de trabajo MINITAB 19
Límite inferior	Mn: 0.30% C: 0.18%	1.195	0	1.714	5	Anexo F
Valores medios	Mn: 0.45% C: 0.20%	2.377	0	2.795	5	Anexo G
Límite superior	Mn: 0.60% C: 0.23%	3.424	3.251	0	5	Anexo H

5. RECOMENDACIONES

La inclusión de baterías en el proceso de fabricación de acero mediante el horno de arco eléctrico no requiere modificaciones o adiciones en las instalaciones, las baterías se agregan sin necesidad de ningún pretratamiento.

Es necesario tener en cuenta que las baterías contienen un porcentaje de humedad (en la simulación un 11.155%), por lo cual no se recomienda cargarlas directamente al metal fundido, ya que generaría una repentina expansión del gas y produciría que el metal fundido salpique. Se recomienda que las baterías sean añadidas en el centro de una cubeta de carga.

Es preciso destacar que las baterías a utilizar en este proceso no pueden contener plomo, ni mercurio. Debido al incremento en el material particulado, es recomendable el uso de sistemas de control de material particulado como ciclones o filtro de mangas.

De acuerdo con Xará *et al.*⁶⁸, un proceso de reciclaje de baterías alcalinas mediante el horno de arco eléctrico no produce un impacto adicional negativo sobre el medio ambiente diferente al producido por el mismo proceso de reciclado de acero. Por otra parte, la adición de baterías no crea problemas adicionales de salud y seguridad para el personal de la planta de acuerdo con⁶⁹. Asimismo, en relación con los resultados obtenidos en la investigación, al introducir baterías en el proceso hay un incremento en los elementos aleantes en el acero lo cual es beneficioso para este. Debido a lo anterior, se recomienda la investigación y experimentación en esta área con el fin de evaluar si este proceso es viable para ser realizado en la industria siderúrgica colombiana.

⁶⁸ XARÁ, Susana; FONSECA, Manuel y COSTA, Carlos. Life cycle assessment of alternatives for recycling abroad alkaline batteries from Portugal. En: The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014. Vol. 19, No. 7, p. 1397.

⁶⁹ PISTOIA, G; WIAUX, J.-P. y WOLSKY, S.P. Op Cit, p.216.

6. CONCLUSIONES

Se logró generar un modelo termodinámico a partir de la utilización del módulo de equilibrio GIBBS de Outokumpu HSC Chemistry y hojas de cálculo, para simular un proceso típico de producción acero en el horno de arco eléctrico junto con las fases de escoria, gases y polvo de acería y se determinan los cambios que se registran en estas fases cuando se incorporan las baterías gastadas.

Se obtienen resultados favorables para la integración de los desechos de baterías gastadas en una operación de reciclaje existente, en este caso, la producción de acero mediante el horno de arco eléctrico. Este uso de las baterías valoriza a las mismas ya que pueden ser usadas como fuente de elementos aleantes en lugar de ser descartadas en centros de acopio.

En relación con los resultados obtenidos en la investigación, se observó la disminución del uso o el reemplazo de elementos aleantes como el manganeso, níquel y cobalto por materiales de desecho como baterías gastadas que contienen estos elementos, junto con los agentes reductores aluminio, carbono y ferrosilicio, lo cual permitió la valoración e inertización de las baterías. Es decir, se logró uno de los propósitos investigativos.

Se logra conseguir una aleación con unos requerimientos de composición química específicos mediante el uso de los metales presentes en las baterías gastadas, junto con los elementos reductores aluminio, carbono y ferrosilicio.

BIBLIOGRAFÍA

BAUKAL, Charles. Oxygen-enhanced combustion. 2 ed. Boca Ratón: CRC Press, 2013. 728p.

BERNARDES, Andrea; ESPINOSA, Denise y TENORIO, Jorge. Recycling of batteries: a review of current processes and technologies. En: Journal of Power Sources, 2004, vol. 130, no. 1-2., p. 291-298.

BOROVSKÝ, T., *et al.* The influence of slag composition on the distribution of manganese between slag and metal in the electric arc furnace. En: Acta Metallurgica Slovaca, 2012, vol. 18, no. 1., p. 28-33.

BRAMFITT, Brice y BENSCOTER, Arlan. Metallographer's Guide. Practices and procedures for Irons and Steels. Ohio: ASM INTERNATIONAL, 2002. 319p.

CADAVID, Gabriel. Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del proceso siderúrgico. Trabajo de grado, Magíster en Ingeniería Química. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2014. 113p.

COLOMBIA. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Norma técnica colombiana, NTC 243. Composiciones químicas de colada para aceros al carbono. [en línea]. Bogotá, D.C.: ICONTEC. 2013. 17p.

COLOMBIA. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Norma técnica colombiana, NTC 2289. Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación, para refuerzo de concreto. [en línea]. Bogotá, D.C.: ICONTEC. 2007. 22p.

Conference : IV International Symposium on Chemistry. "Effect of copper in the Cu-Si-Mn cast iron alloying system." (1-4, JUNIO, 2010: Santa Clara, Cuba). Análisis del efecto de la adición de cobre, manganeso y el silicio en un hierro fundido empleando un diseño de experimentos en regiones restringidas. 2010, 20p.

Da Silva, M.C., *et al.* Characterization Of electric arc furnace dust generated during plain carbon steel production. En: Ironmaking and Steelmaking, 2008, vol. 35, no. 4., p.315-320.

DAEHN, Katrin; CABRERA, André y ALLWOOD, J. Finding the Most Efficient Way to Remove Residual Copper from Steel Scrap. En: Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, vol. 50, no. 3., p. 1225-1240.

DAVIS, Boyd, JAVAID, Amjad y ESSADIQI, E. Final Report on Effect of Impurities in Steel. Canadá: Government of Canadá, 2006. p.1-18.

EKMEKCI, Ismail; YETISKEN, Yasar y CAMDALI, Unal. Mass Balance Modeling For Electric Arc Furnance and Ladle Furnance System in Steelmaking Facility in Turkey. En: JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH INTERNATIONAL, China, 2007, vol. 14, no. 5., p. 1-6.

ELLIS, T.W. y MIRZA, A.H. Battery Recycling: Defining the market and identifying the technology required to keep high value materials in the economy and out of the waste dump. [En línea]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology. 2006. (Recuperado el 12 de julio de 2019.) Disponible en <https://www.nist.gov/tip/wp/pswp/publicly-submitted-white-papers-energy.cfm>

ENRÍQUEZ, José, *et al.* Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte I, ACERÍA ELÉCTRICA. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Departamentos en E.U. de Arquitectura Técnica, 2009, 82p.

ESFAHANI, Shaghayegh. Crystallization of Synthetic Blast Furnace Slags Pertaining to Heat Recovery. A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Toronto: University of Toronto. Materials Science and Engineering, 2016. 153p.

FERELLA, Francesco; DE MICHELIS, Ida y VEGLIÒ, Francesco. Process for the recycling of alkaline and zinc-carbon spent batteries. En: Journal of Power Sources, 2008, vol 183, no.2, p.805-811.

FISHER, Karen., *et al.* Battery Waste Management Life Cycle Assessment. [En línea]. Bélgica: European Portable Battery Association EPBA. 2006. (Recuperado el 20 de junio de 2019.) Disponible en <https://www.epbaeurope.net/techdoc/battery-waste-management-life-cycle-assessment/>

FRUEHAN, Richard, *et al.* The Making, Shaping and Treating of Steel, Steelmaking and Refining Volume. 11 ed. Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1998. 759p.

GOODSHIP, Vannessa y STEVELS, Ab. Waste electrical and electronic equipment (WEE) handbook. 30 ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. 724p.

GUÉZENNEC, Anne-Gwénaëlle., *et al.* Dust formation in Electric Arc Furnace : Birth of the particles. En: Powder Technology, 2005, vol. 157, no. 1-3., p.1-11.

HENRÍQUEZ, Omar y AGUILAR, Erick. Diseño de un horno de arco eléctrico a escala de laboratorio para la obtención de silicio metalúrgico. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del litoral. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, 2015. 113p.

IHOBE. Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones: escorias de acerías. Bilbao: IHOBE, 1999. 131p.

JANKE, D., *et al.* Scrap-based steel production and recycling of steel. En: Materials and Technology, 2000, vol. 34, no. 6., p. 387-399.

KALLEL, Ali., *et al.* Advanves in waste management. Tunisia : WSEAS Press, 2010. 181p.

KHO, T.S., *et al.* Understanding stainless steelmaking through computational thermodynamics Part 1: electric arc furnace melting En: Mineral Processing and Extractive Metallurgy IMM Transactions section C, 2010, vol. 119, no. 1., p. 5.

LEI, Zhang, *et.al.* Energy Technology 2017. Carbon Dioxide Management and Other Technologies. 2017 ed. Suiza: Springer, 2017. 499p.

MINTZ, B.; ABUSHOSHA, R. y CROWTHER, D. N. Influence of small additions of copper and nickel on hot ductility of steels. En: Materials Science and Technology, 1995, vol 11, no. 5., p. 474-481.

MOCCIA, Alberto., *et al.* Caracterización fisicoquímica de los materiales activos presentes en pilas gastadas del tipo Ni-Cd segregadas de un lote de pilas desechadas en la ciudad de Caracas. En: Avances en Química, 2015, vol. 10, no. 1., p. 11-19.

Navas, E.E; Arzola, J. y Batista, A. Producción de aceros al carbono en hornos de arco eléctrico en condiciones de mineral de manganeso. En: Ingeniería Mecánica, 2007, vol. 10, no. 2, p., 23-31

NAVAS, Efraín y BATISTA, Aerles. utilización del mineral de manganeso (pirolusita) en la producción de aceros al carbono. En: Minería & Geología, 2003, vol. 19, no. 3-4., p. 73-78

NDLOVU, Sehliselo; SIMATE, Geoffrey S. y MATINDE, Elias. Waste Production and Utilization in the Metal Extraction Industry. Boca Ratón: CRC Press, 2017. 512p.

PAN, Qiaoyan y WEYHE, Reiner. Review of recycling process with directions for Li-S battery recycling. [En línea]. Funding & tender opportunities. Single Electronic Data Interchange Area. European Comission: High energy lithium sulphur cells and batteries. 2016. (Recuperado el 10 de abril de 2019). Disponible en https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentId_s=080166e5a5f5f370&appId=PPGMS

PARRA, Lina y SÁNCHEZ, Diana. Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco, municipio Tuta-Boyacá. Trabajo de grado, Ingeniería ambiental y sanitaria. Bogotá: Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería, 2010. 139p.

PICLES, C.A. Thermodynamic modelling of the multiphase pyrometallurgical processing of electric arc furnace dust. En: Minerals Engineering, 2009, vol. 22, no., 11. p.977-985.

PISTOIA, G; WIAUX, J.-P. y WOLSKY, S.P. Used Battery Collection and Recycling. Ámsterdam: ELSEVIER, 2001. p.213.

PISTOIA, Gianfranco. Batteries for portable devices. Ámsterdam: ELSEVIER, 2005. 309p.

RYAZANOV, A.G; SENIN, A.V. y KHMELEVA, O.V. Zinc Ferrite Decomposition by Sodium Carbonate and Calcium Oxide at Roasting of Steelmaking Dust. En: Materials Science Forum, 2019, vol. 946. p.474-479.

SABROSO, María del Carmen y PASTOR, Ana. Guía sobre suelos contaminados. Zaragoza: Gobierno de Aragón, Departamento de Economía, Hacienda y empleo, 2004. 109p.

Sadeli, Yunita; Wahyuadi, Johny y Prihandoko, Bambang. Study on Graphite Electric Arc Furnace Waste as a Bipolar Plate Composite Material for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) Application. En: Journal of Materials Science and Engineering , 2011, vol. 1, no. B., p. 178-183.

Salazar-Villalpando, Aria., *et al.* Energy technology 2012 : Carbon Dioxide Management and Other Technologies. 2012 ed. Pittsburgh: The Minerals, Metals & Materials society, 2012. 409p.

SÁNCHEZ-ALVARADO, Ricardo y FRIEDRICH, Bernd. Optimisation of the FeMn and ZnO Production from Spent Pyrolised Primary Batteries – Feasibility of a DC-Submerged Arc Furnace Process. En: World of Metallurgy – ERZMETALL, 2008, vol 61, no. 4., p. 255-269.

SARSAM, Saad I; AL SAIDI, Aamal A y AL TAIE, Afaq H. Influence of Combined Stabilization on the Structural Properties of Subgrade Soil. En: Journal of Geotechnical Engineering, 2017, vol. 4, no. 1., p. 13-24.

SEETHARAMAN, Seshadri. Treatise on process metallurgy. Industrial Processes, Part A. Walthman: ELSEVIER, 2014, 1745p.

SHUVA, Al Hossaini, KURNY, A.S.W. Characterization Of Spent Lithium Ion Batteries In The Process Of Recovery Of Value Metals. En: Materials Science. An Indian Journal, 2013, vol. 9, no. 10. p., 389-394.

STEEL UNIVERSITY. Userguide for EAF simulation. [En línea]. Liverpool: The University of Liverpool. 2006. (Recuperado el 23 de mayo de 2019.) Disponible en <http://content.steeluniversity.org/simulators/eaf/userguide/en/#>

SUN, Ziqi, *et al.* Energy Technology 2018. Carbon Dioxide Management and Other Technologies. 2018 ed. Suiza: Springer, 2018. 618p.

TOULOUEVSKI, Yuri y ZINORUV, Ilyaz. Electric Arc Furnance with Flat Bath, Achievements and Prospects. New York: Springer, 2015. 132p.

VIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MATERIALES CIM. (28-30, OCTUBRE, 2015: Paipa, Colombia). Minería urbana: las pilas y baterías gastadas como recurso metalífero. Paipa: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2016, 5p.

WORRELL, Ernst y REUTER, Markus. Handbook of recycling, State of the art for practicioners, analysts, and scientist. Ámsterdam: ELSEVIER, 2014. 580p.

XARÁ, Susana; FONSECA, Manuel y COSTA, Carlos. Life cycle assessment of alternatives for recycling abroad alkaline batteries from Portugal. En: The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, vol. 19, no. 7., p. 1382-1408.

ZAYURI, Lisette y RODRÍGUEZ, César. Implementación del proceso de formación de escoria espumosa en el horno eléctrico de arco trifásico directo, revestimiento básico de Acerías Paz del Río S.A. mediante el uso de una maquina inyectora. Trabajo de grado, Ingeniería Metalúrgica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías fisicoquímicas, 2005. 122p.

ZUO, H.-B., *et al.* Effects of MnO on slag viscosity and wetting behaviour between slag and refractory. En: Ironmaking & Steelmaking, 2015, vol 43, no 1., p. 1-8.

ANEXOS

Anexo A. Balance de componentes típico de diferentes tipos de baterías desechadas

Componente (% masa)	Alcalinas Zn-MnO₂	Recargables Ni-MH	Recargables Ni-Cd	Recargables Li-ión
Plásticos	4,0	3,8	4,5	39
Carcasa y piezas de metal	21,0	17,2	28,5	-
Papel/Cartón	3,3	3,5	5,0	-
Material Activo Ánodo	23,9	34,1	32,0	28
Material Activo Cátodo	47,8	41,4	30,0	33

Anexo B. Análisis químico típico de los materiales anódicos y catódicos de diferentes tipos de baterías desechadas

Elemento (% masa)	Alcalinas Zn-MnO ₂		Recargables Ni-MH		Recargables Ni-Cd		Recargables Li-ión	
	Ánodo	Cátodo	Ánodo	Cátodo	Ánodo	Cátodo	Ánodo	Cátodo
Zn	69	1,4	0,02	2,9	0,02	0,5	-	-
Mn	0,1	51	2,3	0,07	0,2	0,01	-	-
Ni	-	0,01	50	53	10	51	-	1,2
Cd	-	-	-	-	65	7	-	-
Li	-	-	-	-	-	-	0,85	3,9
Fe	-	0,04	0,25	-	0,03	0,02	-	-
Co	-	-	6,2	3,7	0,3	1,1	-	12,2
La	-	-	18	-	-	-	-	-
Pb	-	-	-	-	-	-	-	-
Na	-	-	0,7	0,7	1,1	1,5	-	-
K	2,83	9,4	1,4	2,0	3,1	3,9	-	-
Al	-	-	-	-	-	-	-	12
Cu	-	-	-	-	0,3	-	50	-
C	-	6,5	1,39	0,8	2,1	1,4	41	-
S	-	0,9	-	-	-	-	-	-

Anexo C. Captura de la hoja de cálculo empleada para realizar los balances de masa

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	
1	Chatarra	suma chatarra	1000		Carbono	Carbon	3.47						Acero	Composición		Pulvo	Composición			Escoria	Composición			
2	Especie química	%	Kg		Especie química	%	Kg						Especie química	%	Kg		Especie química	%	Kg		Especie química	%	Kg	
3	Hierro (Fe)	97.2599533	972.6		C	98.45	3.416215						Fe			ZnFe2O4				CaO				
4	Manganeso (Mn)	0.4177	4.177		Fe	0	0						Mn			Fe3O4				FeO				
5	Carbono (C)	0.33388333	2.33883		S	0.5	0.01735						C			ZnO				SiO2				
6	Fósforo (P)	0.02734333	0.27343		P	0.05	0.001735						P			Mn3O4				MnO				
7	Azufre (S)	0.035964667	0.35965		SiO2	0	0						S			La2O3				Al2O3				
8	Silicio (Si)	0.16901333	1.69013		MgO	0	0						Si			CdO				Ca3(PO4)2				
9	Cromo (Cr)	0.184666667	1.84667		Al2O3	0	0						Cr			Na2CO3				Cr2O3				
10	Nickel (Ni)	0.134266667	1.34267		Fe2O3	0	0						Ni			KCl				MgO				
11	Molibdeno (Mo)	0.02675	0.2675			Total	3.4353						Mo			NaCl				CaS				
12	Cobre (Cu)	0.139166667	1.39167										Cu			Cr2FeO4				MnS				
13	Al2O3	0.1057	1.057		Desgaste electrodos	Electrod	4.11						Al			Cd(OH)2				Ni(OH)2				
14	MgO	0.036966667	0.36967		Especie química	%	Kg						Zn			Cd				Fe3O4				
15	SiO2	0.30163333	3.01633		C	99.8	4.10178						Cd			NaFeO2				CaCO3				
16	Zinc (Zn)	0.17998733	1.79987										Li			Fe				Fe2O3				
17		Total	992.51		Inyección de carbón	Carbón d	17						Na			ZnCl2				Ca2P2O7				
18					Especie química	%	Kg						La			KOH				FeSi				
19	Oxigeno	Puro	26.14		C	89	15.13						Co			CaCl2				NiO				
20	Especie química	%	Kg		Desgaste Refractorio	Refracta	2.53							Total metal	0.000					MoO2				
21	O2(g)	100	26.14		Especie química	%	Kg									Zn				Mn2O3				
22					CaO	36.75	0.929775									*2CaO*Fe2O3				La2O3				
23	Aire	de HSC (kgMas)	12.959		SiO2	2.75	0.069575									K2O				CuO				
24	Especie química	%	Kg		Al2O3	3	0.0759									Na				Total polvc	0.000			
25	O2(g)	23.15	3		Fe2O3	3	0.0759														CuS			
26	N2(g)	75.51	9.78531		MgO	36.75	0.929775														MnO2			
27	CO2(g)	0.046	0.00596			Total	2.080925														Mn3O4			
28		Total	12.7913																		MnP			
29					Baterías	Pilas mu	0														MoO2.75			
30	Cal	Lime	59.24		Especie química	%	Kg														MoO3			
31	Especie química	%	Kg		Fe	19.6273	0														Ca2O			
32	CaO	92.01	54.5067		MnO2	33.7171	0														La5			
33	SiO2	1.51	0.89452		ZnO	20.0409	0														CaC2			
34	Al2O3	0.33	0.53093																		Cd(OH)2			
35	Fe2O3	0.11	0.26346																		COO			
36																					NiO			

Anexo D. Materiales de entrada

Chatarra	Suma chatarra	1000
Especie química	%	Kg
Hierro (Fe)	97.25999533	972.59995
Manganeso (Mn)	0.4177	4.177
Carbono (C)	0.233883333	2.3388333
Fósforo (P)	0.027343333	0.2734333
Azufre (S)	0.035964667	0.3596467
Silicio (Si)	0.169013333	1.6901333
Cromo (Cr)	0.184666667	1.8466667
Níckel (Ni)	0.134266667	1.3426667
Molibdeno (Mo)	0.02675	0.2675
Cobre (Cu)	0.139166667	1.3916667
Al ₂ O ₃	0.1037	1.037
MgO	0.036966667	0.3696667
SiO ₂	0.301633333	3.0163333
Zinc (Zn)	0.179987333	1.7998733
Total		992.51037

Oxígeno	Puro	26.14
Especie química	%	Kg
O ₂ (g)	100	26.14

Aire	Aire HSC (%Masa)	12.958963
Especie química	%	Kg
O ₂ (g)	23.15	3
N ₂ (g)	75.51	9.7853132
CO ₂ (g)	0.046	0.0059611
Total		12.791274

Cal	Caliza	59.24
Especie química	%	Kg
CaO	92.01	54.506724
SiO ₂	1.51	0.894524
Al ₂ O ₃	0.93	0.550932
Fe ₂ O ₃	0.11	0.065164

Total 56.017344

Carbono	Carbón	3.47
Especie química	%	Kg
C	98.45	3.416215
Fe	0	0
S	0.5	0.01735
P	0.05	0.001735
SiO ₂	0	0
MgO	0	0
Al ₂ O ₃	0	0
Fe ₂ O ₃	0	0
Total		3.4353

Desgaste electrodos	Electrodos de grafito	4.11
Especie química	%	Kg
C	99.8	4.10178

Inyección de carbón	Carbón en polvo inyectado	17
Especie química	%	Kg
C	89	15.13

Desgaste Refractario	Refractario básico – Dolomía	2.53
Especie química	%	Kg
CaO	36.75	0.929775
SiO ₂	2.75	0.069575
Al ₂ O ₃	3	0.0759
Fe ₂ O ₃	3	0.0759
MgO	36.75	0.929775
Total		2.080925

Anexo E. Materiales de salida

Acero	Composición	
Especie química	%	Kg
Fe	99.4963	959.116
Mn	0.0546	0.527
C	0.0228	0.219
P	0.000	0.000
S	0.006	0.056
Si	0.0000	0.000
Cr	0.0942	0.908
Ni	0.1376	1.326
Mo	0.0277	0.267
Cu	0.1444	1.392
Al	0.0000	0.000
Zn	0.0167	0.161
Cd	0.0000	0.000
Li	0.0000	0.000
Na	0.0000	0.000
La	0.0000	0.000
Co	0.0000	0.000
Total metal		963.972

Polvo	Composición	
Especie química	%	Kg
ZnFe ₂ O ₄	68.091	17.008
Fe ₃ O ₄	30.945	7.730
ZnO	0.800	0.200
Mn ₃ O ₄	0.164	0.041
La ₂ O ₃	0.000	0.000
CdO	0.000	0.000
Na ₂ CO ₃	0.000	0.000
KCl	0.000	0.000
NaCl	0.000	0.000
Cr ₂ FeO ₄	0.000	0.000
Cd(OH) ₂	0.000	0.000
Cd	0.000	0.000
NaFeO ₂	0.000	0.000
Fe	0.000	0.000

ZnCl ₂	0.000	0.000
KOH	0.000	0.000
CaCl ₂	0.000	0.000
Zn	0.000	0.000
*2CaO*Fe ₂ O ₃	0.000	0.000
K ₂ O	0.000	0.000
Na	0.000	0.000

Total polvo 24.979

Gas Salida	Composición	
Especie	%	Kg
O ₂ (g)	0.000	0.000
N ₂ (g)	46.255	12.230
CO(g)	0.000	0.000
CO ₂ (g)	53.745	14.210
Zn(g)	0.000	0.000
Cd(g)	0.000	0.000
Li ₂ O(g)	0.000	0.000
Na(g)	0.000	0.000
LaO ₂ (g)	0.000	0.000
H ₂ O(g)	0.000	0.000
Cl(g)	0.000	0.000

Total gases 26.440

Escoria	Composición	
Especie química	%	Kg
CaO	59.995	54.145
FeO	19.206	17.334
SiO ₂	8.416	7.596
MnO	5.191	4.685
Al ₂ O ₃	1.844	1.664
Ca ₃ (PO ₄) ₂	1.526	1.377
Cr ₂ O ₃	1.521	1.373
MgO	1.440	1.299
CaS	0.769	0.694
MnS	0.038	0.034
Ni(OH) ₂	0.028	0.026

Fe ₃ O ₄	0.011	0.010
CaCO ₃	0.009	0.008
Fe ₂ O ₃	0.003	0.003
Ca ₂ P ₂ O ₇	0.001	0.000
FeSi	0.000	0.000
NiO	0.000	0.000
MoO ₂	0.000	0.000
Mn ₂ O ₃	0.000	0.000
La ₂ O ₃	0.000	0.000
CuO	0.000	0.000
CuS	0.000	0.000
MnO ₂	0.000	0.000
Mn ₃ O ₄	0.000	0.000
MnP	0.000	0.000
MoO _{2.75}	0.000	0.000
MoO ₃	0.000	0.000
Cu ₂ O	0.000	0.000
LaS	0.000	0.000
CaC ₂	0.000	0.000
Cd(OH) ₂	0.000	0.000
CoO	0.000	0.000
Li ₂ O	0.000	0.000
CdO	0.000	0.000
Na ₂ S	0.000	0.000
Na ₂ O	0.000	0.000
P ₂ O ₅	0.000	0.000
Na ₂ S ₂	0.000	0.000
Ni ₅ P ₂	0.000	0.000
Na ₂ O ₂	0.000	0.000
LaNi ₅	0.000	0.000
Co ₃ O ₄	0.000	0.000
Total escoria		90.250

Anexo F. Optimización de respuesta para valores limites inferiores dentro de la norma NTC 243 para el acero SAE 1020

Optimización de respuesta: C acero, Mn

Parámetros

	Respuesta Meta	Inferior	Objetivo Superior	Ponderación	Importancia
C acero	Objetivo 0.017014	0.18	0.71931	1	1
Mn	Objetivo 0.077221	0.30	1.58849	1	1

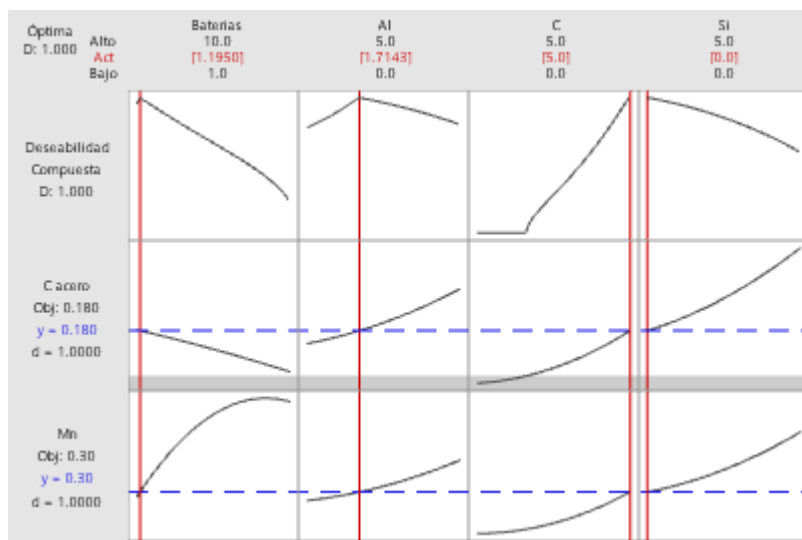
Solución

Solución	Baterías	Al	C Si	C acero Ajuste	Mn Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	1.19497	1.71432	5 0	0.180000	0.300000	1.00000

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor de configuración
Baterías	1.19497
Al	1.71432
C	5
Si	0

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
C acero	0.1800	0.0315	(0.1099, 0.2501)	(0.0703, 0.2897)
Mn	0.3000	0.0895	(0.1006, 0.4994)	(-0.0119, 0.6119)



Anexo G. Optimización de respuesta para valores medios dentro de la norma NTC 243 para el acero SAE 1020

Optimización de respuesta: C acero, Mn

Parámetros

	Respuesta Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
C acero	Objetivo	0.18	0.20	0.23	1	1
Mn	Objetivo	0.30	0.45	0.60	1	1

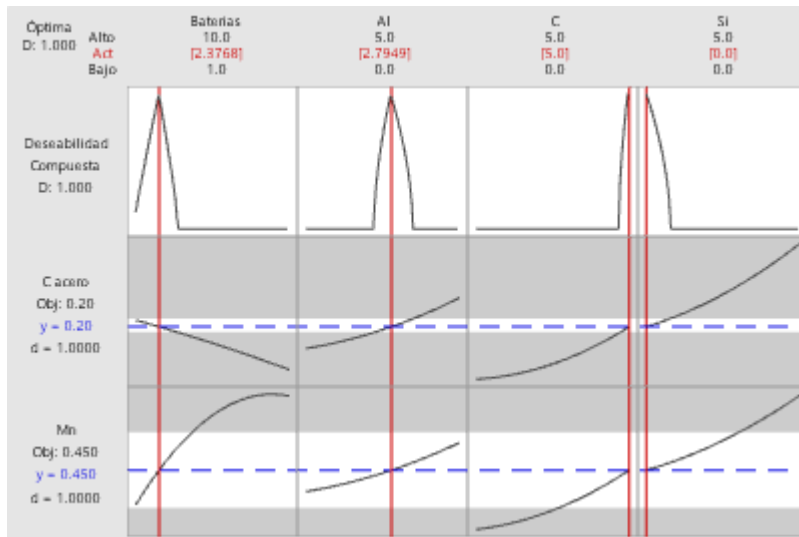
Solución

Solución	Baterías	Al	C	Si	C acero Ajuste	Mn Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	2.37684	2.79489	5	0	0.200000	0.450000	1.00000

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor de configuración
Baterías	2.37684
Al	2.79489
C	5
Si	0

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
C acero	0.2000	0.0304	(0.1323, 0.2677)	(0.0918, 0.3082)
Mn	0.4500	0.0864	(0.2576, 0.6424)	(0.1425, 0.7575)



Anexo H. Optimización de respuesta para valores límites máximos dentro de la norma NTC 243 para el acero SAE 1020

Optimización de respuesta: C acero, Mn

Parámetros

Respuesta Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
C acero	Objetivo 0.017014	0.23	0.71931	1	1
Mn	Objetivo 0.077221	0.60	1.58849	1	1

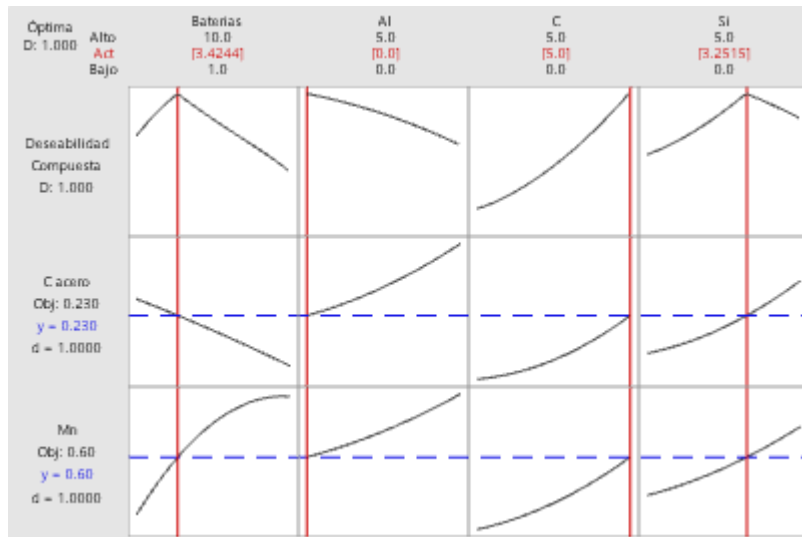
Solución

Solución	Baterías	AI	C	Si	C acero Ajuste	Mn Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	3.42437	0.0000000	5	3.25145	0.230000	0.6	1.00000

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor de configuración
Baterías	3.42437
AI	0.0000000
C	5
Si	3.25145

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
C acero	0.2300	0.0303	(0.1626, 0.2974)	(0.1220, 0.3380)
Mn	0.6000	0.0861	(0.4083, 0.7917)	(0.2929, 0.9071)



Anexo I. Simulación para la optimización de respuesta de los valores límites inferiores

Acero	Composición	
Especie química	%	Kg
Fe	98.9029	973.413
Mn	0.3784	3.724
C	0.1733	1.705
P	0.001	0.008
S	0.001	0.008
Si	0.0001	0.001
Cr	0.1868	1.838
Ni	0.1533	1.508
Mo	0.0272	0.267
Cu	0.1428	1.405
Al	0.0000	0.000
Zn	0.0306	0.301
Cd	0.0001	0.001
Li	0.0004	0.004
Na	0.0000	0.000
La	0.0000	0.000
Co	0.0026	0.025
	Total metal	984.211
Aluminio		1.714
Especie química	%	Kg
Al	100	1.714
Carbono		5
Especie química	%	Kg
C	100	5
Ferrosilicio		0
Especie química	%	Kg
Si	100	0
Baterías		11.95

Anexo J. Simulación para optimización de respuesta para valores medios

Acero	Composición	
Especie química	%	Kg
Fe	98.7166	975.759
Mn	0.5231	5.170
C	0.1812	1.791
P	0.001	0.009
S	0.001	0.009
Si	0.0001	0.001
Cr	0.1861	1.839
Ni	0.1692	1.673
Mo	0.0271	0.267
Cu	0.1435	1.418
Al	0.0000	0.000
Zn	0.0451	0.446
Cd	0.0002	0.002
Li	0.0008	0.008
Na	0.0001	0.001
La	0.0000	0.000
Co	0.0051	0.051
	Total metal	988.444
Aluminio		2.795
Especie química	%	Kg
Al	100	2.795
Carbono		5
Especie química	%	Kg
C	100	5
Ferrosilicio		0
Especie química	%	Kg
Si	100	0
Baterías		23.77

Anexo K. Simulación para la optimización de respuesta de los valores límites máximos

Acero	Composición	
Especie química	%	Kg
Fe	98.5143	977.937
Mn	0.6701	6.652
C	0.2066	2.051
P	0.001	0.014
S	0.001	0.009
Si	0.0002	0.002
Cr	0.1855	1.842
Ni	0.1831	1.818
Mo	0.0269	0.267
Cu	0.1441	1.430
Al	0.0000	0.000
Zn	0.0578	0.574
Cd	0.0003	0.003
Li	0.0011	0.011
Na	0.0001	0.001
La	0.0000	0.000
Co	0.0074	0.073
	Total metal	992.685
Aluminio		0
Especie química	%	Kg
Al	100	0
Carbono		5
Especie química	%	Kg
C	100	5
Ferrosilicio		3.251
Especie química	%	Kg
Si	100	3.251
Baterías		34.24