



Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero en
Metalurgia y Materiales

Propuesta de mejora del sistema de carga al Horno de
Arco Eléctrico de ACINOX Las Tunas.

AUTOR(S): Jan Harold Pérez Velázquez

TUTOR(ES): Dr.C María Caridad Ramírez
Pérez

Lic. Enrique Torres Alarcón

MOA, 2024



Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero en
Metalurgia y Materiales

Propuesta de mejora del sistema de carga al Horno de
Arco Eléctrico de ACINOX Las Tunas.

AUTOR(S): Jan Harold Pérez Velázquez

TUTOR(ES): Dr.C María Caridad Ramírez
Pérez

Lic. Enrique Torres Alarcón

MOA, 2024

AGRADECIMIENTO

A mis padres, porque sin su apoyo, su cariño, comprensión y amor, jamás hubiera podido llegar a este punto tan importante de mi vida que es la culminación de mis estudios.

A mis tutores, Dr.C María Caridad Ramírez Pérez y Lic. Enrique Torres Alarcón quienes han sido mis mentores y excelentes profesores, me han sabido guiar y me ayudaron con el desarrollo de mi proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	II
RESUMEN.....	V
ABSTRACT	VI
INTRODUCCIÓN.....	1
Problema científico:	6
Objeto de investigación.....	7
Campo de acción.....	7
Objetivo General.....	7
Objetivos específicos.....	7
Hipótesis.....	7
Métodos de investigación utilizados:.....	7
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	8
1.1. Minerales de hierro.....	8
1.1.1. Obtención del hierro a partir de los minerales.....	10
1.2. Generalidades de la chatarra.....	11
1.3. Calidad de la Chatarra de acero al carbono. Factores de los que Depende	12
1.4. Clasificación de la Chatarra de acero al carbono según su procedencia	13
1.5. Generalidades del acero.....	13
1.6. Principales elementos químicos de la chatarra.....	15
1.6.1. Hierro (Fe).....	15

1.6.2.	Silicio (Si)	15
1.6.3.	Cobre (Cu).....	16
1.6.4.	Níquel (Ni)	16
1.7.	Hornos de arco eléctrico. Características generales.	16
1.8.	Producción de acero en Cuba mediante el Horno de Arco Eléctrico (HAE)	19
1.9.	Objetivos para la confección de la carga metálica	21
Conclusiones parciales		22
CAPÍTULO II . MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....		23
2.1.	Flujo Tecnológico de la Acería.....	23
2.1.1.	Organigrama de la Acería.....	23
2.1.2.	Aseguramiento a la producción	23
2.1.3.	Taller de elaboración y Afino	24
2.1.4.	Horno cuchara (HC)	27
2.1.5.	Taller de vaciado continuo.....	28
2.1.6.	Taller de Refractario	33
2.2.	Prácticas operativas utilizadas en ACINOX Las Tunas desde su arrancada en 1992 hasta la actualidad.	35
2.3.	Empleo de la chatarra de acero fragmentada	36
2.3.1.	Modelación matemática de optimización de procesos mediante el método regresivo.....	40
2.4.	Ventajas del uso de la chatarra fragmentada.....	42
2.4.1.	Disminución del índice de consumo de energía eléctrica.....	42
2.4.2.	No incrementa el índice de consumo de material refractario por lo siguiente:.....	42

2.4.3.	Se reduce el índice de consumo de electrodos.....	42
2.4.4.	Se logra mayor rendimiento metálico.....	43
2.4.5.	Se disminuye el tiempo de conexión.....	43
2.4.6.	Se reduce el consumo de Cal.....	43
2.4.7.	Se disminuye el consumo de Carbones y Ferroaleaciones.....	44
Conclusiones parciales		45
CAPÍTULO III . ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS		46
3.1.	La chatarra que consumimos normalmente es la que se clasifica como HMS 1 por las normas ISRI 201 y 202.....	47
3.1.1.	Uso de la Chatarra Fragmentada limpia.	47
3.2.	Resultados obtenidos con el uso de la chatarra fragmentada en nuestra planta.....	48
3.2.1.	Energía eléctrica.....	50
3.2.2.	Electrodos de 500 mm.....	51
Conclusiones parciales		51
Conclusiones Generales.....		53
Recomendaciones:		54
Bibliografía.....		55
Anexos		57

RESUMEN

El Acero es un material clave en la construcción de infraestructuras como puentes, carreteras, edificios y líneas de transmisión eléctricas; además constituye un elemento esencial para el funcionamiento de la economía global y en el desarrollo y progreso de las sociedades modernas. Para la producción de acero en Hornos de Arco Eléctrico se utiliza como materias primas la chatarra de acero. El trabajo tiene como objetivo diseñar una propuesta para determinar la eficiencia del horno arco eléctrico a partir de la carga metálica chatarra de acero en la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas; consiste en el uso de los diferentes tipos de chatarra de acero que se utilizan en la producción de acero donde se realiza un balance de la carga metálica, su efecto en el proceso de elaboración de acero, garantiza un rendimiento dentro de los parámetros establecidos como una alternativa para mantener la producción, la calidad del producto final, incidir positivamente en el consumo de energía eléctrica, materiales refractarios y electrodos de grafito. Se utilizan los métodos: histórico-lógico: el que permite establecer un ordenamiento lógico en los referentes teóricos, el sistémico-estructural: se emplea para la concepción y elaboración del proceder propuesto, así como la matemática descriptiva. Se concluye con el proceder diseñado se mejora la gestión de la producción en el rendimiento metálico, dentro de los parámetros establecidos como una alternativa para mantener la producción, la calidad del producto final e incidir positivamente en el consumo de energía eléctrica, materiales refractarios y electrodos de grafito.

Palabra claves: rendimiento de la chatarra, carga metálica, chatarra de acero.

ABSTRACT

Steel is a key material in the construction of infrastructure such as bridges, roads, buildings and electrical transmission lines; It also constitutes an essential element for the functioning of the global economy and in the development and progress of modern societies. For the production of steel in Electric Arc Furnaces, scrap steel is used as raw materials. The objective of the work is to design a proposal to determine the efficiency of the homo electric arc from the metallic load of steel scrap at the Stainless Steel Company of Las Tunas; It consists of the use of the different types of steel scrap that are used in the production of steel where a balance of the metallic load is carried out, its effect on the steel making process, guaranteeing performance within the parameters established as a alternative to maintain production, the quality of the final product, positively impact the consumption of electrical energy, refractory materials and graphite electrodes. The following methods are used: historical- logical: the one that allows establishing a logical order in the theoretical references, the systemic- structural: it is used for the conception and elaboration of the proposed procedure, as well as descriptive mathematics. It concludes with the designed procedure, improving production management in metallic performance, within the established parameters as an alternative to maintain production, the quality of the final product and positively affect the consumption of electrical energy, refractory materials and electrodes. of graphite.

Keywords: scrap performance, metal load, steel scrap.

INTRODUCCIÓN

En las empresas industriales la aplicación de un adecuado manejo de la producción es la clave para que asegure su éxito. Por lo tanto en estas empresas su componente más importante es la producción, en tanto es fundamental que cuenten con un buen control y planificación para que mantengan su desarrollo en un nivel óptimo.

El desarrollo de todos los países dependen de la producción de sus industrias y estas están ligadas íntimamente a la capacidad de respuesta de la industria metalúrgica con relación al suministro de reposiciones metálicas y a la producción de piezas de acero. Alrededor de un cuarto de la producción mundial de acero se produce por el método de Horno de Arco Eléctrico, donde se transforma la carga metálica en metal líquido con una composición química y temperatura específica.

Las empresas de clase mundial se caracterizan por desarrollar un conjunto de capacidades competitivas centradas en una actuación proactiva de la función de producción como arma estratégica competitiva. Tales capacidades se logran al desarrollo de una efectiva estrategia de producción integrada a la estrategia corporativa. Esta se define como un plan a largo plazo para la fabricación de los productos de la corporación.

La siderurgia es una de las industrias más intensivas en emisiones de carbono del mundo. El acero es una combinación formada entre el hierro, una pequeña cantidad de carbono y otros elementos en menor proporción como son el silicio, manganesio y el cromo. Este material por sus diversas propiedades ha sido de los más usados en el mundo para diferentes fines. Las plantas siderúrgicas integradas para producción de acero a nivel mundial emplean diferentes índices de eficiencia para cada uno de sus procesos, donde se debe mantener un control preciso sobre cada uno de las etapas de producción y a su vez los indicadores permiten evaluar el grado de desempeño de una empresa.

Los hornos de arco eléctrico desde sus inicios en los años 90, han constituido una fuente constante de investigación científica multidisciplinaria, en la cual día a día se han implementado mejoras en su funcionamiento, tanto en el área productiva, en el área energética, en el área eléctrica, mecánica, química, etc. Todas estas investigaciones se

han realizado con el propósito de construir hornos más eficientes y mejorar los costos de producción. (B & K, 2011)

El acero es un material indispensable hoy en día ya que reúne características muy deseables como son: resistencia, plasticidad y versatilidad. Es muy difícil imaginarnos la vida actual sin acero ya que está presente en todas partes como pueden ser: las vías de ferrocarril, en las calles, en los automóviles, en las construcciones, en las conducciones de agua, en la maquinaria que genera y conduce la energía, en las herramientas de las fábricas. (B, A, & A, 2014).

Dentro del proceso de fabricación de acero en horno de arco eléctrico (HAE), la preparación de la cesta de chatarra como materia prima fundamental es una de las actividades previas más importantes en esta operación, la misma debe cumplir con requerimiento mínimo de residuales de acuerdo al grado de acero a fabricar. La materia prima carga metálica (chatarra) debe cumplir con la densidad requerida para el mínimo de recargas, es importante la estratificación de tipos de chatarra para optimizar la fusión. (B & K, 2011)

El proceso productivo siderúrgico en Cuba esta integrado por la siderurgica José Martí (Antillana de Acero en La Habana y la Empresa de Aceros Inoxidables Las Tunas, las que utilizan como carga metálica al horno de arco eléctrico chatarra ferrosa virgen.

“La chatarra metálica es una fuente importante de materia prima secundaria para la producción de acero y otros metales. El reciclaje de chatarra metálica contribuye significativamente a la conservación de recursos naturales y a la reducción de emisiones de carbono.” (Tzimas, 2007).

El aumento de la productividad no es el único beneficio de la utilización de chatarra por parte de la industria siderúrgica. La práctica es beneficiosa para el medio ambiente, con una reducción en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), energía, agua y recursos no renovables como el mineral de hierro, el carbón y la piedra caliza. La sustentabilidad radica en la reutilización de los desechos y coproductos internos y externos. (RECICLAJES OLMEDO SL, 2020)

El tipo de materia prima condiciona el proceso de fabricación. En líneas generales, para fabricar acero a partir de arrabio se utiliza el convertidor con oxígeno, mientras que partiendo de chatarra como única materia prima se utiliza exclusivamente el horno de arco eléctrico (proceso electro-siderúrgico). Los procesos en horno de arco eléctrico pueden usar casi un 100% de chatarra metálica como primera materia, convirtiéndolo en un proceso más favorable desde un punto de vista ecológico (American Iron and Steel Institute (AISI), 2022)

Aun así, la media de las estadísticas actuales calcula que el 85% de las materias primas utilizadas en los hornos de arco eléctrico son chatarra metálica (American Iron and Steel Institute (AISI), 2022).

La Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas es una industria metalúrgica, única en el país dotada de las instalaciones necesarias para producir cualquier tipo de acero inoxidable, al carbono o aleados, produce aceros de menor complejidad y costos, como el acero al carbono en forma de palanquillas, obtenidas mediante colada continua, así como la laminación de barras de diversos perfiles, cuyas producciones se destinan a la exportación y al consumo nacional. (Empresa ACINOX Las Tunas, s.f.)

La Empresa ACINOX Las Tunas, fue constituida el 1ero de enero de 1991, amparado por la Resolución 271 del 28 de diciembre de 1990, emitida por el Ministro de Economía y Planificación de la República de Cuba, y actualmente se encuentra integrada a la Organización de Dirección Económica GESIME, la que a su vez es atendida por el Ministerio de Industrias. (Empresa ACINOX Las Tunas, s.f.)

Posee como antecedente la creación por el Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz, del Laminador 200T el día 28 de noviembre de 1988. Posteriormente, al crearse la Empresa, su Acería contó con tecnología suministrada por la firma Italiana DANIELI, e inicialmente fue concebida para la producción de 150 mil toneladas anuales de planchones de aceros inoxidables, a lo que se producen escasas 27 016 toneladas de este producto. A finales de los años 80 y principio de los 90, ya se había comenzado a aplicar en el mundo la ruta triple (HAE-AOD-VOD), por lo que desde un inicio la tecnología no se encontraba al nivel del estado del arte mundial. Realiza su primera colada de acero inoxidable el día 15 de marzo de 1992. Económicamente no pudo competir en el mercado internacional y

se vio obligada en el año 1996 a reorientar sus producciones a la de aceros al carbono de baja aleación de forma rentable. (Empresa ACINOX Las Tunas, s.f.)

A partir de ese momento se comenzó la exportación de palanquillas de aceros al carbono, oscilando entre 70000 y 90000 toneladas anuales, debido a que dicha tecnología sí era muy eficiente para las nuevas producciones. Cuenta con una Acería con capacidad para producir más de 14000 toneladas de palanquillas de acero al carbono anualmente, y un Laminador con capacidad de para producir 40000 toneladas anuales de barras corrugadas. La producción de barras corrugadas está destinada al mercado nacional, fundamentalmente a la construcción de viviendas y programas priorizados, en tanto las palanquillas en un gran porcentaje se destinan a la exportación. Es uno de los pilares fundamentales de la actividad industrial del territorio homónimo y además del significativo aporte al PIB de la provincia, constituye una importante fuente de empleo. A lo largo de todos estos años la empresa ha sido reconocida por sus aportes a los diferentes programas de la Revolución, así como por el elevado nivel técnico profesional de sus trabajadores y sus significativos aportes científicos y tecnológicos. Se posee en el año 2017 los records productivos que responden a la fabricación de 14432 toneladas de acero líquido y 13 788 de acero terminado. (Empresa ACINOX Las Tunas, s.f.)

Misión:

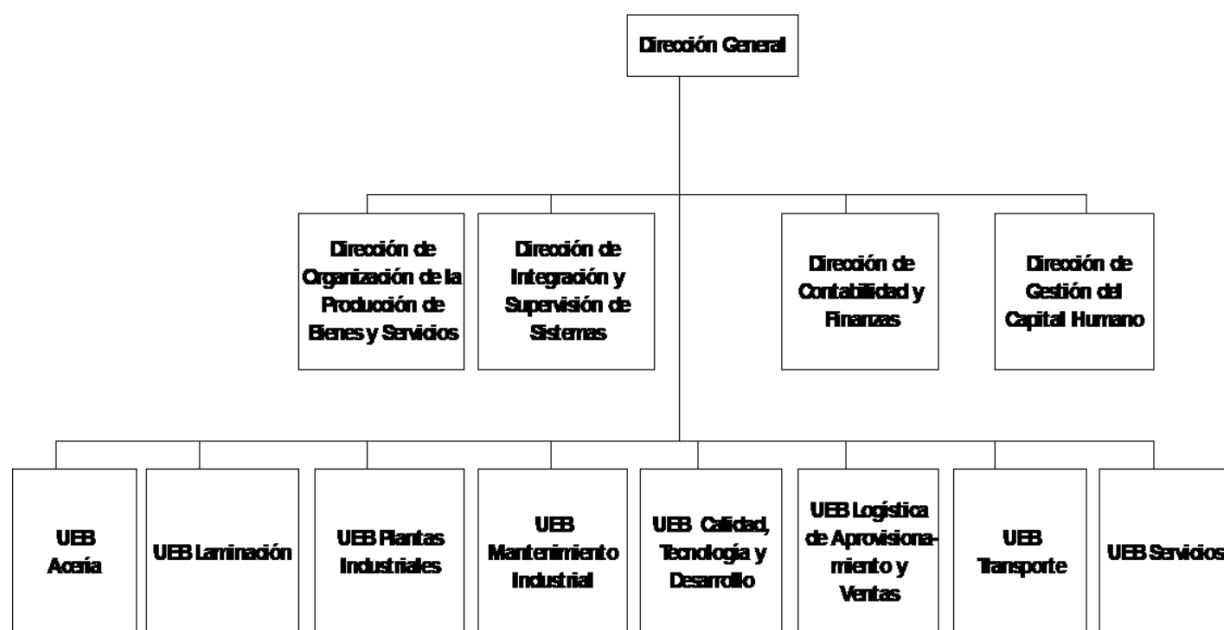
Asegurar la producción y comercialización de palanquillas de acero al carbono y aleados, así como barras corrugadas para refuerzo de hormigón. Satisfacer las necesidades del mercado nacional e internacional, con productos de calidad.

Visión:

Estando posicionada en el mercado internacional con aceros al carbono de calidad y en el mercado nacional con barras para refuerzo de hormigón, proyectarse en la diversificación e incremento de la producción de aceros aleados y especiales, así como en la exportación de barras corrugadas.

Empresa Acinox Las Tunas posee una estructura formada por el siguiente:

Organigrama empresarial



Organigrama empresarial ACINOX Las Tunas.

En el ánimo de la ampliación del objeto social y con ello asumir la economía circular y la estrategia medioambiental en la entidad, se declaran 5 pilares económicos como estrategia de recuperación económica, que permiten gestionarla desde diferentes direcciones y que tienen como objetivos: reducir las normas de consumo, una utilización racional de los portadores energético, la sustitución gradual del componente importado, la potenciación de la fabricación nacional y propia en la empresa para el logro de la soberanía en la gestión del mantenimiento en la entidad, así como una adecuada gestión de los residuos derivados de los procesos productivo con la finalidad de convertirlos en productos con alto valor y valor de uso, todo lo anterior con el único de fin de maximizar las utilidades. (Empresa ACINOX Las Tunas, s.f.)

Esta industria representa para la provincia y el país una vía de ingresos en moneda libremente convertible, ya que su producción se comercializa en el área de Centroamérica, el Caribe, Europa y Asia.

Para la producción de acero al carbono, la materia prima principal para la carga metálica del horno de arco eléctrico, es la chatarra ferrosa. Esta es suministrada por las Empresas de Recuperación de Materias Primas (ERMP) perteneciente al Grupo Empresarial del Reciclaje (GER). (Empresa ACINOX Las Tunas, s.f.)

Las empresas no cuentan con el equipamiento especializado necesario para la determinación de la composición química de la misma, así como tampoco cuentan un proceso de beneficio para ella, donde es que se pueden eliminar la presencia de metales no ferrosos ni las materias extrañas ni los vicios ocultos. (Empresa ACINOX Las Tunas, s.f.)

La experiencia del autor en el ejercicio de sus funciones como especialista de chatarra en el grupo técnico de la acería con la revisión de documentación como parte de producción, análisis de series históricas, actas del consejo de dirección de la UEB de Calidad, Tecnología y Desarrollo, participación en los consejos de dirección de la Dirección de producción, auditorías externas e internas al proceso de elaboración de acero, en entrevistas con directivos y trabajadores, así como resultados del Balance Empresarial al cierre de cada año, trabajo de investigación realizados en la industria se identificaron deficiencias en relación con el cómo realizar la gestión de la producción en la elaboración de acero.

Le permite plantear al autor brechas existentes desde el punto de vista teórico en la necesidad de diseñar como llevar a cabo un adecuado proceso de la producción en la elaboración de acero, y como se sistematizarán las actividades desarrolladas en las diferentes etapas del proceso productivo, con énfasis en el subproceso de aseguramiento entre las que se destacan:

- Prolongados tiempos de preparación de la carga metálica,
- Inadecuada distribución y homogenización de la chatarra en la confección de la misma,
- Introducción de materias extrañas dentro de las cestas (tierra, madera, goma, etc. provocando largos tiempos de proceso en el horno.

Pérdida de tiempo para acomodar carga y bajar contenido de carbono en la composición química del baño metálico.

Problema científico:

Cómo mejorar el sistema de carga de Horno de Arco Eléctrico de ACINOX Las Tunas.

Objeto de investigación

Carga metálica del Horno de Arco Eléctrico de ACINOX Las Tunas.

Campo de acción

Ineficiencia del horno arco eléctrico a partir de la carga metálica.

Para dar solución al problema científico y cumplir con el objetivo propuesto se formuló la hipótesis de investigación que:

Lo anterior evidencia que, aun cuando esta organización muestra resultados positivos en su gestión de control de procesos, en particular en los relacionados con la elaboración de acero, se requiere continuar perfeccionando la carga metálica y su impacto en el HAE.

Objetivo General

Determinación de las insuficiencias en el sistema de carga en vistas a su mejora en el Horno Arco Eléctrico de ACINOX Las Tunas.

Objetivos específicos

- Sistematizar de forma conceptual, el aspecto de la producción y las eficiencias de los hornos arco eléctricos, con énfasis, en la carga metálica.
- Comparar las características físico – químicas de la carga metálica

Hipótesis: Si se diseña una propuesta de mejora para determinar la eficiencia del horno arco eléctrico a partir de la carga metálica en la Empresa de Aceros inoxidables de Las Tunas, contribuye a la eficiencia de la producción del acero.

Métodos de investigación utilizados:

Del nivel teórico:

Histórico-lógico: permite establecer un ordenamiento lógico en la caracterización gnoseológica y referentes teóricos respecto al objeto y campo de investigación.

Análisis y síntesis: permite establecer la caracterización gnoseológica y definir los referentes teóricos y conceptuales que sirven de sustento al proceso investigativo en relación con el objeto y el campo de investigación.

Hipotético-deductivo: posibilita la construcción de la hipótesis, al estructurar las conexiones entre las categorías que la integran y la relación causal que se establece entre ellas.

La observación: para evaluar el estado actual y el cambio en los resultados del trabajo y el comportamiento de propuesta de mejora en el proceso.

Dinámicas de grupo: para realizar el trabajo grupal, obtener información y solucionar problemas de conjunto.

Consulta a especialistas: para valorar la pertinencia de la propuesta de mejora y fundamentar su significación práctica en la Empresa de Aceros inoxidables de Las Tunas.

El aporte práctico metodológico de la investigación lo constituye él para determinar la eficiencia del horno arco eléctrico a partir de la carga metálica en la Empresa de Aceros inoxidables de Las Tunas lo cual contribuye a contextualizar esta actividad a las circunstancias actuales, al entorno socioeconómico territorial y las particularidades en que se desenvuelve la empresa.

Por otro lado el mismo responde al proceso de perfeccionamiento empresarial y a la aplicación de los lineamientos de la política económica y social del partido y la revolución, a los que se puede adaptar de forma coherente, por lo que constituye un instrumento de trabajo para especialistas y directivos de este sector metalúrgico.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1. Minerales de hierro

El hierro constituye cerca del 1,51% en peso de la corteza terrestre. Es uno de los siete metales conocidos desde la antigüedad. Aunque muy raramente se encuentra libre en

la naturaleza, la facilidad con que sus óxidos son reducidos por el carbón y la abundancia de los mismos en la superficie terrestre, hicieron posible su descubrimiento y aplicación a la fabricación de utensilios y armas. El hierro se encuentra en numerosos minerales y mineraloides, magnetita (Fe_2O_4), hematita (Fe_2O_3), limonita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), siderita (FeCO_3), pirita (FeS_2), etc. Si bien hay una diversidad de minerales de hierro distribuidos sobre la corteza terrestre (óxidos, carbonatos, sulfuros, sulfatos, silicatos, etc.) son pocos los minerales usados comercialmente como fuente de hierro. La razón estriba en la cantidad de metal, o ley, que el mineral contenga. Para ser utilizados en la industria siderúrgica estos materiales deben contener un mínimo de 40% de hierro. Las impurezas (ganga), que siempre acompañan a los minerales, disminuyen el porcentaje de hierro en los mismos. La magnetita contiene, teóricamente 72,3% de hierro, la hematita 69,9%. En cambio, el contenido teórico de hierro en la pirita es de apenas 46,6%. Los porcentajes reales disminuyen debido a la ganga. (Katz, 2011)

Según el autor, otro factor que puede condicionar el uso de un mineral de hierro como materia prima para la obtención de acero, es la presencia de ciertos elementos que puedan dificultar el proceso o que le comuniquen al producto características indeseadas.

En Argentina hay yacimientos de minerales de hierro en la región Noroeste (Jujuy, Salta, Catamarca y La Rioja), en la región cuyana (Mendoza, San Juan y San Luis) y en ciertas zonas de la Patagonia. Pero el único yacimiento ferrífero en funcionamiento en escala de explotación industrial es el yacimiento de Sierra Grande, en la Provincia de Río Negro. El yacimiento se encuentra en la cuenca ferrífera de Sierra Grande. Está ubicado en las proximidades de la localidad del mismo nombre, a 130 kilómetros de la localidad de San Antonio Oeste. La estructura dominante de este yacimiento es un anticlinal cuyo núcleo ha sufrido un proceso intrusivo que transformó la hematita original (Fe_2O_3) en magnetita (Fe_3O_4). Tiene la forma de un manto de dirección general N-S y aflora a lo largo de más de 3 km. El espesor medio es de 10 m, en tanto la profundidad alcanzada hasta el presente con conocimiento de las características del mineral, es de 800 m. La mineralización se compone principalmente de magnetita, con turingitas y hematitas como minerales secundarios. (Katz, 2011)

Las reservas comprobadas del yacimiento son cercanas a los 90 millones de toneladas, mientras que las probables más posibles alcanzarían los 200 millones de toneladas. Este

complejo minero industrial está integrado por la mina subterránea propiamente dicha, las plantas de beneficio magnética y por flotación, transporte del concentrado, pelletización, playa de productos terminados y embarcadero. Su producción se exporta, mientras que la industria siderúrgica se provee íntegramente de mineral de hierro importado, especialmente, desde Brasil. (Katz, 2011)

El hierro cristaliza en el sistema cúbico. Por debajo de los 910 °C, la celdilla elemental es cúbica intracentrada. Hasta los 768 °C tiene propiedades magnéticas (hierro α) a esta temperatura desaparecen las propiedades magnéticas (hierro β) y la arista de la celdilla elemental aumenta ligeramente de 2,86 a 2,90 Ångstrom. A los 910 °C se produce la transformación a hierro γ y en el cual la celdilla es cúbica de caras centradas. A partir de los 1.401°C es cúbica intracentrada (hierro δ estructura que se mantiene hasta los 1.530 °C (temperatura a la que el hierro funde). Por lo tanto, en sentido estricto, el hierro tiene sólo dos formas alotrópicas la α , estable hasta 910°C y, desde 1.401 hasta 1.530 °C y la γ , que es estable únicamente entre 910 y 1.401 °C. Sin embargo, los cambios de estado son relativamente lentos, especialmente a medida que disminuye la temperatura del metal, y es bastante frecuente encontrar ambas formas fuera de sus límites de temperatura. (Katz, 2011)

Se puede obtener hierro de elevada pureza electrolizando soluciones de sus sales (cloruros, sulfatos, etc.). En este proceso se utiliza chatarra de hierro como ánodo. El hierro puro, así obtenido, es muy frágil. Sin embargo, sometido al proceso de recocido se vuelve dúctil, adquiriendo buenas propiedades eléctricas y magnéticas. Pero, en la industria no se utiliza el hierro puro sino aleado con otros elementos entre los cuales el más importante es el carbono. (Katz, 2011)

1.1.1. Obtención del hierro a partir de los minerales

Según Katz (2011) la historia del hierro es la historia del hombre. Desde su descubrimiento, en tiempos primitivos, el hombre con su inventiva logró convertirlo en acero y adecuarlo a los múltiples usos que hoy tiene. Desde una aguja hasta un buque; desde un delicado instrumento hasta la Torre Eiffel. Si bien el hierro es conocido por el hombre desde hace más de 6000 años, se tienen muy pocos datos sobre su modo de obtención en la antigüedad. En los Pirineos tuvo origen un procedimiento de obtención

denominado "forja catalana", que se utilizó hasta el siglo XIV. Las forjas catalanas consistían en pequeños pozos o en crisoles, con las paredes revestidas de arcilla, dentro de los cuales se introducía el mineral junto con una gran cantidad de carbón vegetal. El fuego era atizado con fuelles manuales o accionados a pedal. En estos hornos no se alcanzaba la temperatura de fusión del hierro, sino que se obtenía una masa metálica esponjosa impregnada en escorias que se separaban mediante un batido enérgico. De esta manera, apenas si se obtenía un tercio del hierro, el resto se perdía con la escoria. A partir del siglo XIV se comenzó a utilizar un horno llamado alto fuego, precursor de los actuales hornos de cuba. En estos hornos se alcanzaba una temperatura más elevada lo que provocaba una fusión parcial del hierro. Según las técnicas de trabajo, se podía obtener hierro dulce, hierro duro y un material duro, pero frágil llamado arrabio. El arrabio se consideraba un producto desechable debido a su fragilidad. Más tarde, se comenzó a aprovechar fundiéndolo y colándolo en moldes. Todos estos procedimientos eran directos, es decir, se obtenía el hierro a partir del mineral. Posteriormente, fueron sustituidos por el proceso indirecto, mediante el cual, a partir del mineral, se obtiene primero el arrabio y de este, por un tratamiento posterior, la aleación de hierro con el contenido de carbono deseado. (pág. 18)

1.2. Generalidades de la chatarra

La palabra *chatarra* procede del euskera, *txarra*, que significa, "lo viejo". Según el diccionario es un conjunto de trozos de metal de desecho, principalmente base hierro. La chatarra de hierro se utiliza en la producción de acero, y cubre un 40% de las necesidades mundiales (RECICLAJES OLMEDO SL, 2020).

La chatarra en la metalurgia es considerada como una valiosa materia prima secundaria que puede ser utilizada para reducir la dependencia de los recursos naturales y minimizar los impactos ambientales asociados con la extracción de minerales. (World Steel Association, 2018).

El uso de chatarra en la metalurgia no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también ofrece beneficios económicos al reducir los costos de producción y mejorar la eficiencia de los procesos metalúrgicos. (Reck & K. et al., 2008).

La gestión adecuada de la chatarra en la metalurgia es fundamental para garantizar un suministro constante de materia prima secundaria de alta calidad y promover la economía circular en la industria del metal. (European Commission , 2014).

El aumento de la productividad no es el único beneficio de la utilización de chatarra por parte de la industria metalúrgica. La práctica es beneficiosa para el medio ambiente, con una reducción en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), energía, agua y recursos no renovables como el mineral de hierro, el carbón y la piedra caliza. La sustentabilidad radica en la reutilización de los desechos y coproductos internos y externos. (B & K, 2011)

El tipo de materia prima condiciona el proceso de fabricación. En líneas generales, para fabricar acero a partir de arrabio se utiliza el convertidor con oxígeno, mientras que partiendo de chatarra como única materia prima se utiliza exclusivamente el horno de arco eléctrico (proceso electro-siderúrgico). Los procesos en horno de arco eléctrico pueden usar casi un 100% de chatarra metálica como primera materia, convirtiéndolo en un proceso más favorable desde un punto de vista ecológico (American Iron and Steel Institute (AISI), 2022).

Aun así, la media de las estadísticas actuales calcula que el 85% de las materias primas utilizadas en los hornos de arco eléctrico son chatarra metálica (American Iron and Steel Institute (AISI), 2022).

1.3. Calidad de la Chatarra de acero al carbono. Factores de los que Depende

- Su facilidad para ser cargada en el horno de arco eléctrico,
- Su comportamiento de fusión (densidad de la chatarra, tamaño, espesor, forma),
- Su composición química, siendo fundamental la presencia de elementos residuales que sean difíciles de eliminar en el proceso del horno de arco eléctrico.

1.4. Clasificación de la Chatarra de acero al carbono según su procedencia

1. Chatarra reciclada: formada por despuntes, rechazos, etc. originados en la propia fábrica. Se trata de una chatarra de excelente calidad (Inc. (ISRI), 2014).
2. Chatarra de transformación: producida durante la fabricación de piezas y componentes de acero (virutas de máquinas herramientas, recortes de prensas y guillotinas, etc.) (Inc. (ISRI), 2014).
3. Chatarra de recuperación: suele ser la mayor parte de la chatarra que se emplea en la acería y procede del desguace de edificios con estructura de acero, plantas industriales, barcos, automóviles, electrodomésticos, etc. (Inc. (ISRI), 2014).

La obtención del acero pasa por la eliminación de las impurezas que se encuentran en el arrabio o en las chatarras, y por el control, dentro de unos límites especificados según el tipo de acero, de los contenidos de los elementos que influyen en sus propiedades. Los desechos de acero podrían ser reintroducidos en la industria, el porcentaje de acero reciclado se estima del 46%. Considerando la relativa facilidad con la que el acero puede ser reciclado y las ventajas obtenidas cuando se utiliza acero reciclado (requiere cuatro veces más energía producir acero de mineral virgen que reciclarlo, resulta claro que hay muchas posibilidades de mejora. Las propiedades metálicas del acero son ventajosas ya que permiten que la separación del acero sea físicamente viable tanto en flujos de desecho como en plantas de construcción o demolición usando imanes para separar el metal del resto de residuos. La naturaleza magnética de los metales férricos facilita la separación y manejo durante el reciclado. (Reck & K. et al., 2008)

1.5. Generalidades del acero

La producción de acero es un proceso complejo que implica la transformación de materias primas como mineral de hierro, chatarra y otros materiales en acero utilizable. Según (Wang, Zhang, & Wang, 2021), la producción de acero a través del horno de arco eléctrico ha ganado importancia debido a su flexibilidad y capacidad para utilizar chatarra como materia prima. Este enfoque permite una mayor eficiencia energética y una reducción de emisiones en comparación con otros métodos de producción de acero.

El acero ha demostrado su capacidad para cumplir los criterios que han hecho posible su masiva utilización en el pasado y en el presente, y en base a sus características cuenta con excelentes perspectivas de futuro. El acero está presente en todo cuanto nos rodea y ello gracias a sus excelentes atributos; los principales son los siguientes:

- Excelentes características mecánicas y estructurales, a considerar en relación con su peso requerido.
- Muy buenas propiedades técnicas y de fabricación, que hacen que el material sea fácil de conformar en caliente y frío, fácil de mecanizar y ensamblar por soldadura u otros procesos, fácil de proteger contra la corrosión a través de alteraciones en su composición (aceros inoxidables) o por revestimiento y pintado (galvanizado, chapa prepintada, hojalata, electrocincado).
- Bajo coste unitario, cuando lo comparamos con el de otros materiales alternativos y consideramos los pesos requeridos para obtener iguales prestaciones. Igualmente, precisa un menor consumo energético que otros materiales (el 25% del requerido para producir aluminio). Para obtener prestaciones equivalentes, el aluminio a emplear es 2,8 veces más caro que el acero, y el material polimérico 3,8 veces más (precios orientativos).
- Alta disponibilidad, siendo su producción 20 veces superior a la totalidad del resto de los materiales metálicos no férreos. El elemento básico, el hierro, constituye del orden del 5,6% de la corteza terrestre, siendo una materia prima de suministro seguro.
- Material comparativamente estable, en lo relativo a sus reducidas variaciones de coste y en la consistencia y reproducibilidad de sus características, que su controlado proceso de fabricación garantiza.
- Material altamente adaptable a los requerimientos que se precisan. Existen más de 2 000 grados de acero estandarizados, de los que 1 500 se consideran de calidad especial. Importantes controles de su estricta composición, de su proceso y evolución metalúrgica (microestructura, tamaño de grano, proporción y estado de fases, etc.), así como tratamientos térmicos y termomecánicos posteriores, permiten obtener el

acero preciso (normalizado o desarrollado específicamente). La industria del acero cuenta con una enorme experiencia acumulada.

- Respetuoso con el medio ambiente, destacando su facilidad para el reciclaje. Su carácter magnético permite su fácil separación, y el empleo obligado del acero reciclado o chatarra para la producción de nuevo acero, hace que su tasa de reciclabilidad sea la mayor de todos los materiales: el nuevo acero se fabrica empleando, como promedio, del orden de un 40% de chatarra o acero reciclado, con la favorable repercusión medioambiental y económica que ello supone.
- En la actualidad, anualmente los fabricantes de acero reciclan del orden de 425 millones de toneladas de acero en forma de chatarra. Ello equivale a 1 150 000 toneladas recicladas diariamente, o lo que es lo mismo, 48 000 toneladas por hora, o 13 tm cada segundo.

1.6. Principales elementos químicos de la chatarra

1.6.1. Hierro (Fe)

La chatarra metálica, que a menudo consiste en hierro y acero, es una de las fuentes más comunes de chatarra. Según (George & Alvin, 2018), la chatarra de hierro y acero es una fuente valiosa de materiales para la producción de acero reciclado.

1.6.2. Silicio (Si)

Al ser adicionados, aún en pequeñas cantidades, ejercen influencia en el tipo de lingote que producen, siendo el aluminio el más poderoso; una variación del 0,005% al 0,015% de aluminio, o del 0,01% al 0,03% de silicio cambia totalmente la estructura del lingote. (Reck & K. et al., 2008)

Ambos causan efecto desoxidante severo, por lo cual tienen gran uso en la producción de aceros calmados.

En grandes cantidades (del 0,6 al 3,0%), el silicio mejora las propiedades magnéticas de los aceros de bajo carbono, permitiendo su empleo como núcleos de laminaciones en varias máquinas eléctricas. En el caso del aluminio, del 0,2 al 0,4% refuerza la acción

beneficiosa del silicio. Pero tanto uno como otro reducen sensiblemente la conductividad térmica del acero, y ralentizan y dificultan su recalentamiento. (Reck & K. et al., 2008)

El aluminio, según un artículo publicado en el reciclaje de chatarra de aluminio es esencial para reducir la demanda de aluminio primario y minimizar el impacto ambiental. (Resources, Conservation and Recycling)

1.6.3. Cobre (Cu)

Cuando se encuentra en cantidades mayores al 0,2%, el cobre mejora la resistencia de los aceros a la corrosión atmosférica, pero aumenta la dureza, afectando negativamente a su deformabilidad. Dado que el cobre tiene un bajo punto de fusión, los aceros que lo contienen sufren un “quemado” superficial durante el recalentamiento. La chatarra de cobre es valiosa debido a las propiedades únicas de este metal. Un estudio publicado en (Waster Management) destaca la importancia del reciclaje de chatarra de cobre para reducir la necesidad de extracción de cobre de minas.

1.6.4. Níquel (Ni)

El níquel es otro elemento presente en la chatarra metálica, y su reciclaje es significativo para reducir la dependencia de la extracción de níquel primario. Un informe del (International Nickel Study Group, 2018) resalta la importancia del reciclaje en la gestión sostenible de los recursos de níquel.

1.7. Hornos de arco eléctrico. Características generales.

El principio de funcionamiento de los hornos de arco eléctrico se basa en transformar la energía eléctrica sea de carácter continuo o alterno en calor, para ser aplicada a la carga metálica, produciendo la elevación de temperatura hasta alcanzar el punto de fusión del acero. (B & K, 2011)

Para el funcionamiento de los hornos de arco de carácter alterno o continuo, la energía eléctrica proviene de una red trifásica en alta tensión, ingresa a una subestación y mediante un circuito eléctrico de potencia llega a los electrodos. El circuito eléctrico consta de una línea de entrada desde la subestación hacia un transformador principal, cables refrigerados por agua, tubos de cobre y un sistema de control comandado por un

PLC para el movimiento de los electrodos. (B & K, 2011), como se aprecia en la figura 1.

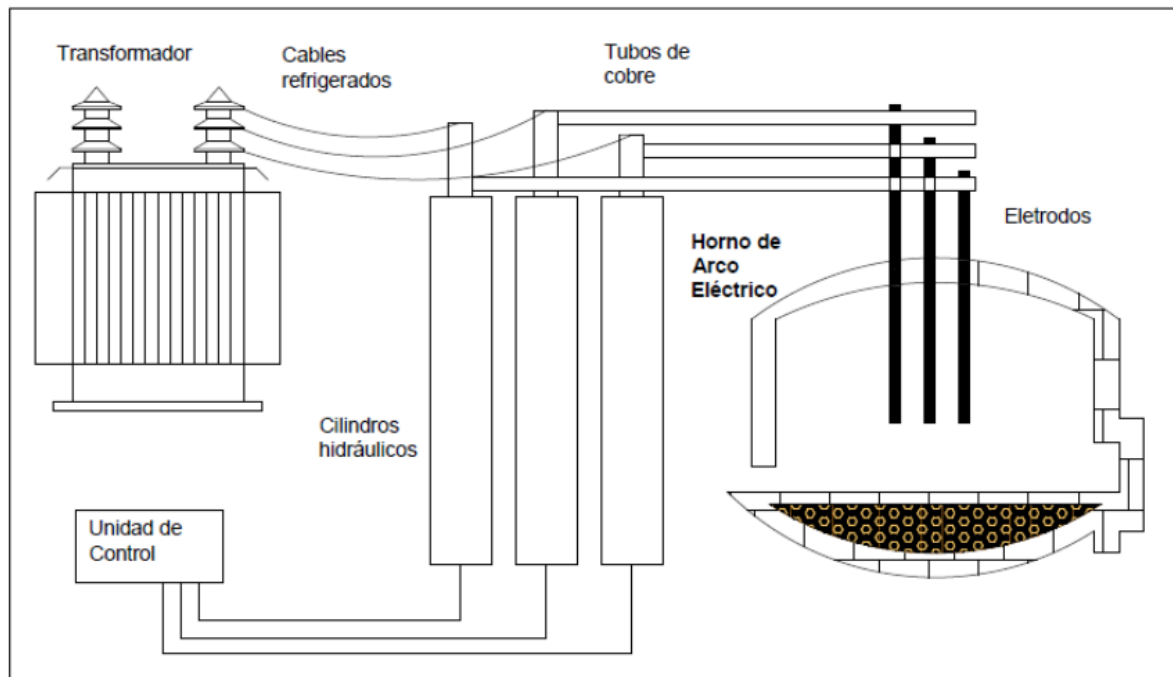


Figura 1.1 Esquema del horno de arco eléctrico.

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

El sistema de control trabaja comandado por un PLC que controla el movimiento de los electrodos mediante la regulación de la corriente eléctrica en cada fase al momento que la punta del electrodo entra en contacto con la carga metálica, el control se ejecuta directamente a tres válvulas proporcionales que permiten el accionamiento de tres cilindros hidráulicos para controlar la longitud de arco siendo esta la distancia entre la punta del electrodo y la carga metálica. (B & K, 2011)

Los hornos de arco eléctrico tienen un sistema de enfriamiento por agua que regula la temperatura de los paneles que se encuentran alrededor del horno, el sistema de enfriamiento también refrigera los cables de poder y a los electrodos. (Y, 2013)



Figura 1.2 Carga metálica de chatarra.

(Fuente: Planta Industrial ACINOX Las Tunas, 2023.)

En la operación de los hornos de arco eléctrico la carga metálica figura 2, recibe la energía en forma de calor entregada por los arcos eléctricos generados entre las puntas de los electrodos y la carga metálica. La energía aumenta la temperatura de la carga metálica para provocar su fusión esto ocurre en la primera etapa del proceso, en la segunda etapa la energía suministrada es usada para calentar la carga líquida hasta obtener la temperatura óptima de fusión que el proceso necesita. (Y, 2013).

El estudiar los niveles de intensidad, tensión, factor de potencia y potencias de un horno de arco eléctrico, permite obtener las condiciones óptimas de funcionamiento del horno, siendo estas:

Máxima productividad (t o t/h), desde el punto de vista eléctrico el objetivo es transmitir la mayor potencia a una determinada carga metálica para obtener la productividad deseada. (Y, 2013).

Máximo rendimiento (kWh/t), minimizar las pérdidas energéticas en relación a la potencia consumida. (B & K, 2011).

Minimizar los costos de producción (\$/t), considerar el punto de operación óptimo del horno y no solo el ahorro energético sino también, el consumo de electrodos, consumo de refractarios, costos de energía química, costos de materia prima y la mano de obra. (B & K, 2011).

1.8. Producción de acero en Cuba mediante el Horno de Arco Eléctrico (HAE)

Dentro del proceso de fabricación de acero en horno de arco eléctrico (HAE), la preparación de la cesta de chatarra es una de las actividades previas más importantes en esta operación, la misma debe cumplir con requerimiento mínimo de residuales de acuerdo al grado de acero a fabricar. Debe, además, cumplir con la densidad requerida para el mínimo de recargas. Muy importante es la estratificación de tipos de chatarra para optimizar la fusión. Por todo lo anterior es que constituye un objetivo fundamental en nuestra empresa ACINOX Las Tunas.

El proceso productivo siderúrgico en Cuba (Antillana de Acero en La Habana y ACINOX Las Tunas, utilizan como carga metálica al horno de arco eléctrico chatarra ferrosa virgen.

Es por ello la necesidad de confección de una carga metálica que responda a las exigencias del proceso de elaboración del acero, en la Unidad Empresarial de Base (UEB) de la acería en la Empresa (ACINOX Las Tunas), se han presentados prolongados tiempos de preparación de la carga metálica, inadecuada distribución y homogenización de la chatarra en la confección de la misma, introducción de materias extrañas dentro de las cestas (tierra, madera, goma, etc. provocando largos tiempos de proceso en el horno, debido a espera por carga, pérdida de tiempo para acomodar carga y bajar contenido de carbono en la composición química del baño metálico, trayendo consigo altos consumos de energía eléctrica, material refractario e improductividad en el proceso de elaboración de acero.

Cuba, con una economía abierta y dependiente de sus relaciones económicas externas, no está exenta de este entorno turbulento, además el país ha experimentado el recrudecimiento del bloqueo económico, comercial y financiero que ha significado cuantiosas pérdidas, obligando a una constatación de la reestructuración de la economía y buscar su propio camino de desarrollo económico, utilizando para ello las nuevas posibilidades de inserción internacional en los marcos de la Alianza Bolivariana para los Pueblos de Nuestra América (ALBA) y la Comunidad de Estados Latinoamericanos y Caribeños (CELAC).

La Empresa ACINOX Las Tunas es una entidad metalúrgica, única en el país dotada de las instalaciones necesarias para producir cualquier tipo de acero inoxidable, al carbono o aleados. Una vez que no logró obtener aceros inoxidables eficientemente, detuvo su fabricación e inició la producción de aceros de menor complejidad y costos, como el acero al carbono en forma de palanquillas, obtenidas mediante colada continua en el taller de la acería, así como la fabricación de barras de diversos perfiles en el taller de laminación, cuyas producciones se destinan a la exportación y al consumo nacional. Esta industria representa para la provincia y el país una vía de ingresos en moneda libremente convertible, ya que su producción se comercializa en el área de Centroamérica, el Caribe, Europa y Asia.

Para la producción de acero en ACINOX Las Tunas, la materia prima principal para la carga metálica del horno de arco eléctrico, es la chatarra ferrosa. Esta es suministrada por las Empresas de Recuperación de Materias Primas (ERMP) perteneciente al Grupo Empresarial del Reciclaje (GER). Estas empresas no cuentan con el equipamiento especializado necesario para la determinación de la composición química de la misma, así como tampoco cuentan un proceso de beneficio para ella, donde es que se pueden eliminar la presencia de metales no ferrosos ni las materias extrañas ni los vicios ocultos. Véase a continuación:



Figura 1.3 Chatarra ferrosa

1.9. Objetivos para la confección de la carga metálica

Por ello es que se traza el objetivo de lograr confeccionar una carga metálica que responda a las exigencias del proceso de elaboración de acero.

Para el desarrollo de este objetivo general, nos trazamos los siguientes objetivos específicos:

1. Evaluación del tiempo de confección de la carga metálica al horno por estratos.
2. Caracterización de la chatarra ferrosa que entra a la empresa desde el punto de vista químico y físico-químico.
3. Implementación de una metodología para la carga metálica del horno.
4. Evaluar los resultados de la implementación de la metodología para la correcta carga metálica al horno para la producción de acero en ACINOX Las Tunas.

Conclusiones parciales

El uso de la carga metálica en un horno de arco eléctrico es una práctica fundamental para la industria del reciclaje de metales, pues permitió la reutilización de materiales valiosos y redujo la dependencia de materias primas vírgenes.

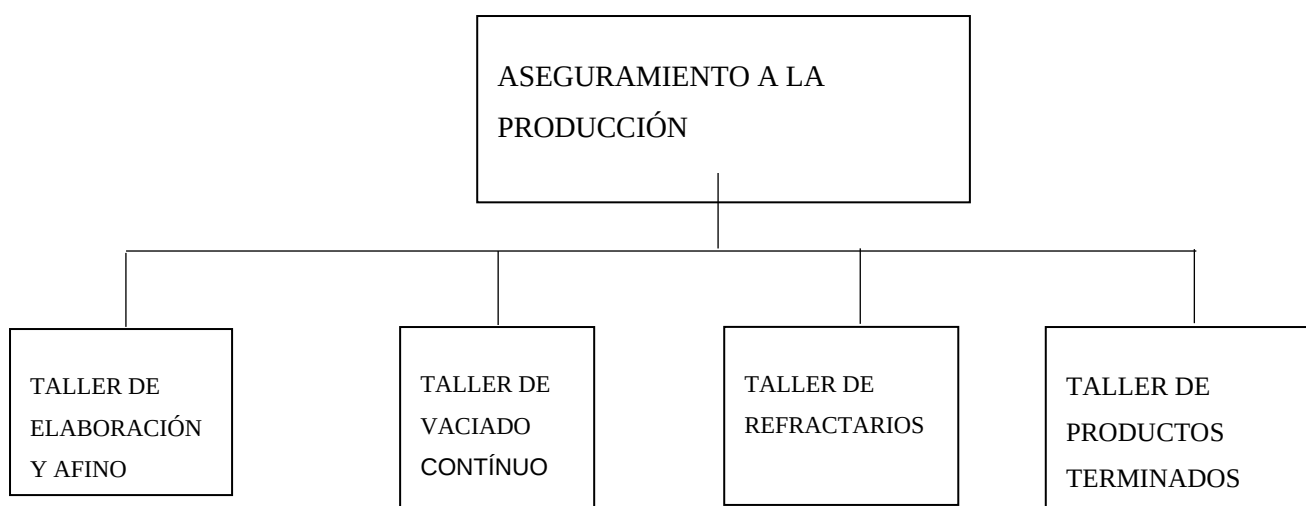
Tuvo un impacto significativo en la eficiencia del proceso de fusión, la calidad del metal producido y la rentabilidad de la operación.

CAPÍTULO II . MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

En la búsqueda, de lograr mejores resultado, en el proceso de elaboración de acero, en este caso partiendo de la confección de la carga metálica, a través de la introducción de chatarra con mayor densidad, que esté libre de materias extrañas y residuales, de manera que incida en la disminución del consumo de energía eléctrica, de material refractario, de electrodos de grafito y de óxido de calcio, además de introducir mejoras en dicho proceso.

2.1. Flujo Tecnológico de la Acería

2.1.1. Organigrama de la Acería



2.1.2. Aseguramiento a la producción

Nuestro proceso tecnológico comienza con la preparación de la carga de la chatarra (almacenadas en 4 fosos de 2,5 m de profundidad) ayudado por dos grúas de 15 t cada una, dotadas de pulpos y electroimanes para facilitar la carga a las cestas cada una con un volumen de 40 m³, una plataforma giratoria para el desvío de los carros porta-cestras hacia la nave principal, éstos carros porta-cestras son autopropulsados eléctricamente a partir de baterías y motores de corriente directa, dotados de un sistema para el pesaje de la carga metálica. Presenta una zona de oxicorte para la preparación de la chatarra con las dimensiones requeridas. Se cuenta además con un sistema de ferroaleaciones conformado por una tolva soterrada y 18 silos (6 del horno de arco eléctrico y 12 del

horno cuchara) para el almacenamiento y suministro de todas las ferroaleaciones, materiales y otros aditivos a emplear en el horno de arco eléctrico (en lo adelante HAE), vertido del HAE, horno cuchara (en lo adelante HC), instalación de oxidación y desgasificación al vacío (en lo adelante VOHSD), así como la estación de espera. Presenta un transfer de 5 t en la nave principal para el movimiento de los materiales.

2.1.2.1. Modificaciones tecnológicas ejecutadas en el tiempo

- 1- Modificación del sentido de descarga del transportador 315 a las cestas, el cual estaba paralelo al eje de la nave central y se cambió de manera perpendicular a ésta, para lograr que durante la carga de las cestas al HAE los materiales se ubiquen debajo de los tres electrodos, con lo que se facilita la fusión de estos evitando que se ubicaran en la zona desde fase 1 a la ventana de trabajo provocando una zona muerta, es decir aglomeración o islotes de estos, imposibilitando la fusión de los mismos y dificultando las operaciones de desescoriado y operaciones metalúrgicas a través de la ventana de trabajo del HAE (año 1999).
- 2- Sustitución del sistema mecánico-articulado de apertura de las cestas por un sistema mecánico de pasador fijo. Con esto se disminuyó en un alto porcentaje los fallos en las aperturas de las cestas, así como el balanceo de las mismas durante estas operaciones, lo que provoca pérdidas de tiempo, averías, derrame de chatarra, posibles accidentes, etc. por estas causas (año 2019).
- 3- Se levantó la tolva soterrada del sistema de ferroaleaciones generando la construcción de una rampa para la descarga de los materiales (año 1993).

2.1.3. Taller de elaboración y Afino

2.1.3.1. Horno de arco eléctrico (HAE)

Las cestas son cargadas por medio de una grúa de 100 t al HAE, el cual trabaja con electrodos de grafito de diámetro 500 mm, un transformador de corriente alterna de 40 MVA que admite una sobrecarga de hasta el 20 % durante 15 min, paneles de cobre y de acero en la base de la cuba y en su parte superior respectivamente así como una bóveda de acero conformada por tubos al igual que el delta, este último con el resto de la zona de los electrodos en refractario, todos estos elementos refrigerados con agua,

consta además con un sistema de control automático de la presión interna del HAE y de la temperatura de los gases a la salida del conducto de humos de éste vinculados al sistema de depuración de humos, un sistema de medición de temperatura (5 puntos) en la parte exterior del fondo de la solera para alertar sobre el espesor del refractario así como en todos los paneles de la cuba y bóveda a lo que se suma una caja BACKUP que permite operar en emergencia. Además, en el área de fusión sobre la plataforma de trabajo del horno existen otros equipos auxiliares: Lanza MORE articulada enfriada por agua para la inyección de oxígeno por la ventana de trabajo del horno, , rampa de oxígeno, sistema manual de lanza para la toma de temperatura, sistema manual de toma de muestras a través de cucharones y moldes troncocónicos, estación de preparación de electrodos dotada con una llave dinamométrica neumática y una llave dinamométrica mecánica, una máquina ALIVA de proyección de masa refractaria en forma gunitada para la reparación de las paredes y una similar centrífuga para el banco del horno.

La capacidad del Horno es de 60 t y el vertido es por piquera convencional. El proceso de fusión de la carga metálica es totalmente automatizado por un autómatas programable ubicado en la cabina de mando acoplado a dos computadoras que actúan como interfaz hombre-máquina llamadas MMI (por sus siglas en ingles). El proceso de elaboración del acero se realiza por las siguientes etapas:

- Fusión de la carga metálica (Intensificación con Oxígeno).
- Desfosforación.
- Fusión de las ferroaleaciones, fundamentalmente FeCrHC suministrados por un sistema de ferroaleaciones (Intensificación con Oxígeno).
- Calentamiento del acero (escoria espumosa sin inyección de carbono).
- Reducción.
- Vertido.



Figura 2.1. HAE ACINOX Las Tunas.

2.1.3.2. Modificaciones tecnológicas ejecutadas en el tiempo:

- 1-** Eliminación de los paneles de cobre ubicados entre la solera y la parte superior de la cuba del HAE, causado en lo fundamental por la gran incidencia en las averías de estos (perforaciones de los mismos) y la necesidad de incrementar la capacidad (volumen) de trabajo del HAE para aumentar el acero líquido fundido hasta 60 t (año 1999).
- 2-** Manipulador de lanzas consumibles de tres lanzas para la inyección de oxígeno supersónico (2) y de carbón (1), dotado de mando a control remoto. La modificación anterior generó otra de modo inducido, consistente en elevar la zona recubierta en refractario a partir de la solera que existía y con ello subir la altura de la ventana de desescoriado para evitar derrames del acero líquido durante las operaciones normales del HAE (año 1999).

- 3- La adquisición de una máquina profesional VELCO para la inyección de carbón y lograr la realización de la práctica de escoria espumosa (año 1999).
- 4- Incorporación de un carro auto propulsado para la limpieza de la ventana (año 1999).
- 5- Sistema de enfriamiento de electrodos por spray (año 1999).
- 6- Sustitución del equipo electrónico de medición de temperatura SIDERTEMP por el OLTEK, éste último podía utilizar las sondas combinadas de $O_2 - C$ y con ello no solo medir la temperatura sino también el contenido de carbono en el baño metálico y además, ya el SIDERTEM no se estaba fabricando (año 2007).
- 7- Modificación del conducto enfriado de extracción de los gases (año 2012).

2.1.4.Horno cuchara (HC)

Una vez terminado el proceso de fusión de la carga en el horno de arco eléctrico, el acero es vertido a una cazuela con capacidad nominal de 60 t con inyección de Ar o N_2 , donde ocurre una desoxidación primaria del acero y se ajusta el metal al 80% de la marca. La cazuela es trasladada al desescoriador para la eliminación de la escoria hasta un remanente aproximado entre 200 a 400 Kg y posteriormente al horno cuchara con ayuda de un carro porta-cuchara basculante que facilitaba el desescoriado, dotado de un sistema de motores eléctricos para su traslación, un sistema de pesaje y un sistema de inyección de gases (N_2 o Ar), todo esto soportado sobre una cadena porta-cables. El horno cuchara es de corriente alterna con bóveda y delta enfriada por agua, trabaja con electrodos de grafito de 300 mm y posee un transformador de 20 MW de potencia que admite una sobrecarga de hasta el 20 % durante 15 min. El proceso de calentamiento es automático controlado por un autómata acoplado a dos computadoras que actúan como interfaz hombre-maquina (MMI). En este agregado se realiza un preajuste del acero hasta valores muy cercanos a su composición final, calentamiento y homogenización de la temperatura. Además, en este agregado sobre la plataforma de trabajo, existen otros equipos auxiliares: Quemador vertical del HC para mantener la temperatura del refractario de la cazuela durante la espera del vertido del HAE ubicado entre este y el HC, un desescoriador y una rampa de Ar y N_2 (todos en el nivel ± 0.00), sistema manual de lanza para la toma de temperatura, sistema manual de toma de

muestras Deep Ping (chambelona) y estación de preparación de electrodos dotada de una llave dinamométrica mecánica.

2.1.4.1. Modificaciones tecnológicas ejecutadas en el tiempo

- 1- Se cambia de posición el quemador vertical, para mantener la temperatura del refractario de la cazuela durante la espera del vertido del HAE ubicado entre este y el HC, colocándose cerca del eje de columna y en la zona intermedia entre el VHSOD y la IVC de la nave central (año 1999).
- 2- Se incorpora un equipo para la medición de temperatura del acero líquido FERROTROM en serie con el SIDERTEMP existente. Lo anterior fue para tener una mayor seguridad en la medición y garantizar el posterior proceso en la instalación de vaciado continuo (año 1995).
- 3- Se sustituye el sistema de traslado del carro cuchara a motor eléctrico por un sistema mecánico (winche reversible) (año 2004).
- 4- Sustitución del delta enfriado con agua por uno conformado en refractarios en forma de tres arbeolos independientes, es decir uno por electrodo.
- 5- Se sustituye la central hidráulica ubicada en el carro cuchara para el basculamiento del mismo y se conecta directamente a la central del HC a través de una manguera (año 1994).
- 6- Eliminación del sistema de pesaje y basculamiento del carro cuchara causado por las reiteradas averías generadas por derrame de acero y escorias durante las diferentes etapas del proceso (año 1994).

2.1.5. Taller de vaciado continuo

2.1.5.1. Equipo de oxidación y desgasificación al vacío (VOHSD)

Una vez realizado el preajuste del acero en composición química y temperatura en el HC, se envía a la estación de oxidación y desgasificación al vacío, empleando la grúa de 100 t. El proceso inicia conectando la manguera que suministra los gases de agitación a la cazuela, seguidamente se ubica esta sobre el soporte existente en el interior del

contenedor (tanque) del VOHSD y finalmente se coloca la tapa de sacrificio sobre la cazuela, la misma consiste en un aro metálico conformada en refractario y tiene como función apantallar todas las salpicaduras que se generan en la cazuela durante el proceso de oxidación, desgasificación y reducción del acero.

Una vez realizada esta operación se desplaza la tapa del contenedor hasta la posición de toma de muestra y temperatura, efectuando la misma con el empleo de una lanza automática o en su defecto de modo manual, seguidamente se procede a cerrar el contenedor para iniciar el proceso de disminución de la presión interna en el contenedor (vacío), para lo que se emplea vapor de agua con los siguientes parámetros ($P \geq 12$ bar, $T \geq 195$ °C y un Flujo= (6.2-8.0) t/h), el que es generado por una caldera.

Antes de iniciar el vacío hay que verificar que se cumplen todos los consensos establecidos para ello y seguidamente se define la ruta a tomar, si es la ejecución del vacío a baja o a alta capacidad, siendo la diferencia en cada una de estas rutas la secuencia de entrada y salida de los eyectores que trabajarán en cada una de ellas. Esto solo define si el vacío se logra a menor o mayor velocidad, es decir en mayor o menor tiempo de operación.

Al lograr una presión vacuométrica en el rango de 150 a 160 tor se comienza el proceso de oxidación, el cual concluye al alcanzarse una presión entre los 50 y 70 torr (de llegar a los 50 torr sin inyectar todo el O_2 calculado se interrumpe este), marcando estos valores el fin de esta etapa del proceso, se continua el vacío sin interrumpir el proceso de desgasificación del acero con lo que se logrará la descarburación extrema del mismo como consecuencia de los valores máximos de vacío que se alcanzan en esta etapa, siendo cercanos al cero absoluto (inferior a .0.5 torr).

Estas condiciones de operación se deben mantener durante un tiempo no menor de 5 a 6 min, con lo cual se logra obtener valores de O_2 , N_2 e H_2 en la composición química del acero inferiores a 20, 30 y 2 ppm respectivamente así como un % C entre 0.005 y 0.08, dado a que a esta presión tan baja se rompe nuevamente el equilibrio C- O_2 reiniciándose así un nuevo proceso de desoxidación con el propio O_2 disuelto en el acero y los óxidos metálicos existentes en la escoria más los mezclados con el acero. Concluida esta etapa se procede a despresurizar el contenedor para lo cual se inyecta previamente 1 m³ de N_2 antes de abrir la tapa con el fin de incrementar la presión en el interior del contenedor

y desconcentrar el contenido de CO remanente evitando posibles explosiones al entrar el oxígeno contenido en el aire de la atmósfera, seguidamente se toma la muestra de composición química y temperatura, teniendo como objetivo fundamental verificar el %C contenido en el acero, de ser estos valores los adecuados se procede a la adición del mix de reducción y seguidamente al ajuste del acero, este último proceso se puede desarrollar en la propia estación del VHSOD o terminarla en la estación de espera, dónde se hacen las precisiones finales del ajuste por vía de adiciones de ferroaleaciones por el sistema previsto para ello o de modo manual a lo que se suman en esta las operaciones de homogenización de temperatura, composición química y decantación de las inclusiones no metálicas a flujos y presiones de agitación con Ar o N₂ según lo requiera el proceso.

Finalmente, antes de enviarlo a la instalación de vaciado continuo (en lo adelante IVC) se verifica nuevamente la composición química y la temperatura, de estar estas variables en los rangos exigidos por el cliente y el proceso de vaciado, se procede a la adición del polvo de cobertura al metal en la cazuela para disminuir las pérdidas de temperatura, trasladando ésta a IVC con la grúa de 100 t.



Figura 2.2. Vaciado continuo

2.1.5.2. Modificaciones tecnológicas ejecutadas en el tiempo

- 1-** Se incorpora un sistema de medición de la presión de vacío en mbar siendo los rangos de operación los siguientes: Al lograr una presión vacuométrica en el rango de 250 a 270 mbar se comienza el proceso de oxidación, el cual concluye al alcanzarse una presión entre los 130 y 170 mbar (de llegar a los 130 mbar sin inyectar todo el O_2 calculado se interrumpe este), marcando estos valores el fin de esta etapa del proceso, se continua el vacío sin interrumpir el proceso de desgasificación del acero con lo que se logrará la descarburación extrema del mismo como consecuencia de los valores máximos de vacío que se alcanzan en esta etapa, siendo cercanos al cero absoluto (inferior a 1 mbar).
- 2-** Se incorpora un equipo para la medición de la composición de los gases de salida del VOHSD (CO_2 y CO).

- 3- Se compra y monta una máquina de inyección de alambre de dos hilos independientes cada uno.
- 4- Se incorpora un extractor de gases en el tanque de sello de agua en la descarga de los condensadores para evacuar estos y es lanzado directamente por encima del techo de la nave para evitar las explosiones y nivel de contaminación de la atmósfera alrededor del VOHSD con el gas CO.
- 5- Se modifica el recorrido interno del agua en el interior del condensador principal para mejorar el intercambio térmico gas/agua y facilitar el proceso de profundización del vacío en menor tiempo.

En la Máquina de Vaciado Continuo se pueden elaborar palanquillas en las secciones 130x130 mm, 140x140 mm y 160x160 mm con las siguientes características:

Tipo	DANIELI ITS-602	
➤ Número de líneas	2	
➤ Radio de curvatura	6 m	
➤ Amplitud de oscilación	7 mm	
➤ Frecuencia de oscilación	65-463 golp/min	
➤ Velocidad de vaciado	0.25-6.0 m/min	
➤ Cristalizador	Tipo curvo con radio 6 m	
➤ Altura	780 mm	
➤ Control de nivel	Radiactivo Co 60	
➤ Zonas de enfriamiento secundario	2	

Artesas

➤ Capacidad	10 ton
➤ Profundidad de trabajo	700 mm
➤ Sistema de cierre	Stopper
➤ Sistema de Corte	Antorchas (oxígeno-LPG) 2 u
➤ Sistema de medición de temperatura	SIDERTEMP-II
➤ Tiempo de colada	110 min
➤ Tiempo de reactivación después de Colada	45 min

- Longitud Máxima de las Palanquillas 12 m

Después de vaciado el acero en forma de palanquillas las mismas son transportadas mediante grúas viajeras para el área de producto terminado. El área de producto terminado posee un área total de 3600 m². La misma está dividida en dos naves, la cual posee un área cubierta de 20x 72 m y cuenta con el siguiente equipamiento:

- Dos grúas viajeras de capacidad 30 t para la manipulación del producto.
- Un equipo de corte automático (máquina de corte) que emplea para su funcionamiento LPG para el corte del producto final.
- Un equipo de corte manual que emplea para su funcionamiento LPG y oxígeno (corte de acero al carbono).

2.1.5.3. Operaciones que se realizan en el área

- 1- Enfriamiento del producto
- 2- Limpieza del producto
- 3- Identificación del producto según norma interna o especificaciones del cliente
- 4- Inspección visual para la detección de defectos (superficiales, de forma, inspección de la longitud y sección
- 5- Marcaje de las muestras metalográficas y de composición química según lo requiera el proceso
- 6- Corte del producto
- 7- Aceptación o no del producto luego de verificar que se cumplan todas las especificaciones descritas en la orden de producción de previo consenso con el cliente

La nave número dos cuenta con una grúa viajera de capacidad de 20 t, la misma está concebida para el almacenamiento de la producción terminada.

2.1.6. Taller de Refractario

Cuenta con una nave de reparaciones refractarias compuesta por.

- Área de reparación de Cazuelas
- Área de reparación de Artesas.

- Área de reparación de otros agregados
- Área de preparación de Cazuelas para la colada

Para la producción consta con 6 Cazuelas con capacidad de 60 t y 12 Artesas con capacidad de 12 t.

Las Artesas para las coladas se revisten con masa básica de sacrificio de funcionamiento en frío; además la componen un módulo de Piezas Especiales Isostáticas compuesta por:

2 boquillas de colada.

2 Snorkell protector del chorro desde la artesa al molde.

2 Asta tapones para la regulación del flujo de acero desde la artesa al molde.

1 Tubo cubre chorro para la protección del vaciado de la Cazuela a la Artesa.

La zona de preparación de Cazuelas está diseñada para la revisión y cambio de las piezas que componen el sistema del Cierre de Corredera y el sistema de insuflado compuesta por:

1 Bloque

1 Tapón Poroso

1 Bloque porta Buza

1 Buza

1 Juego de Placa

Para la protección del Sistema del Cierre antes del vertido del HAE se emplea Arena de Cobertura. Durante el transporte y vaciado de las Cazuelas y Artesas se emplea como cobertura superficial material aislante.

2.2. Prácticas operativas utilizadas en ACINOX Las Tunas desde su arrancada en 1992 hasta la actualidad.

2.2.1.1. Aseguramiento a la producción:

➤ DANIELLI (Italia):

La carga de las cestas se realizó de dos formas diferentes:

- Solo se cargó chatarra sin ningún otro material.
- Se cargaba el total de la chatarra, entre el (80 – 90) % del material portador de níquel en forma de NiO con un contenido de níquel entre el 73 % y 78 % en big bag en el centro de la cesta así como toda la cal requerida para la fusión.

2.2.1.2. Horno de arco eléctrico:

➤ DANIELLI (Italia):

Se iniciaba con la fusión de la chatarra de acero al carbono hasta valores que permitiera desescoriar lo suficiente para evacuar el mayor contenido de fósforo presente en la misma, durante ésta etapa se adicionaba la cal requerida para la fusión y seguidamente se comenzaba la adición de las ferroaleaciones que incluían tanto al FeCrHC como el FeMnHC y el sinter de níquel, éste último en big bag con previa apertura de la bóveda. Todos ellos en diferentes mix de carga para atenuar la ebullición violenta del baño por altas concentraciones de oxígeno y carbono y el enfriamiento brusco del baño. Durante todo el proceso se inyectaba oxígeno para lograr un contenido de carbono de vertido inferior a 0,8 % requerido para la metalurgia secundaria con el objetivo de garantizar el mayor rendimiento posible del cromo, manganeso y del níquel. Terminado el proceso de fusión y los contenidos de carbono, cromo y níquel eran los esperados se procede a la etapa de reducción con un mix compuesto por FeSi y aluminio más cal y fluorita (CaF₂). Alcanzado el objetivo previsto en composición química y temperatura se procede al vertido, durante el mismo se realiza una pequeña reducción con FeSi y/o aluminio. Todo el metal y la mayor cantidad posible de escoria contenida en el interior del horno son vertidos a la cazuela.

El régimen eléctrico más común utilizado en ésta práctica fue el siguiente:

2.3. Empleo de la chatarra de acero fragmentada

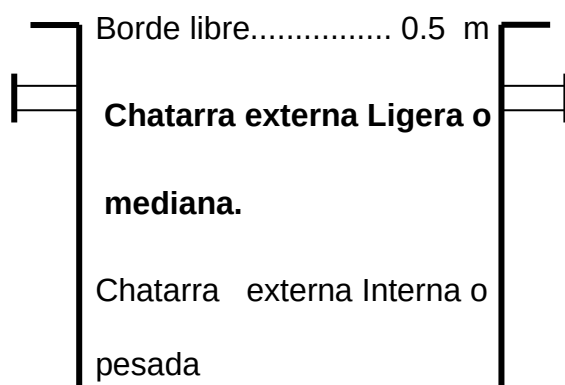
	Potencia disponible (22,4 MW)			Potencia disponible (23,6 MW)			Potencia disponible (24,7 MW)			Potencia disponible (25,8 MW)		
	TAP/Curva	MW total	Tiempo (min)	TAP/Curva	MW total	Tiempo (min)	TAP/Curva	MW total	Tiempo (min)	TAP/Curva	MW total	Tiempo (min)
1ra.												
C	6/3	0,875	4	6/3	0,875	4	6/3	0,875	4	6/3	0,875	4
E												
S	11/3	9,450	25	12/3	9,450	24	13/3	9,450	23	11/3	9,450	23
T												
A												
2da.	6/3	10,325	4	6/3	10,325	4	6/3	10,325	4	6/3	10,325	4
C												
E	11/3	24,320	40	11/3	24,320	38	11/3	24,320	37	11/3	24,320	37
S												
T	9/5	29,095	15	9/5	29,095	15	9/5	29,095	15	9/5	29,095	15
A	4/4	31,360	10	4/4	31,360	10	4/4	31,360	10	4/4	31,360	10

El objetivo de este capítulo es describir los materiales y métodos empleados, así como la técnica experimental utilizada en la investigación, las cuales se describen a continuación los datos.

El consumo de chatarra de acero fragmentada nos ha permitido lograr mejoras en el proceso de elaboración de acero, en el Horno de Arco Eléctrico; en lo adelante HAE.

PE P	PARA TODAS LAS MARCAS DE ACEROS AL CARBONO	FECHA: 13/07/2017	Versión: 01
CONDICIÓN: ES APLICABLE A CUALQUIER TIPO DE CARGA			

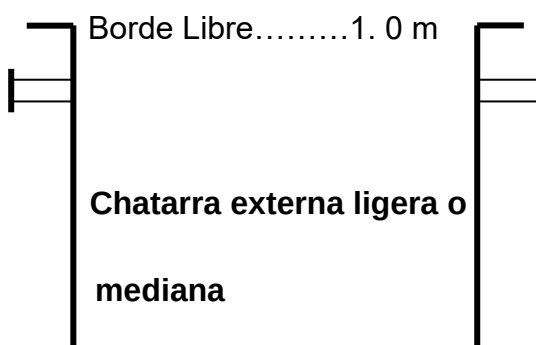
CESTA # 1



Chatarra H. Fundido

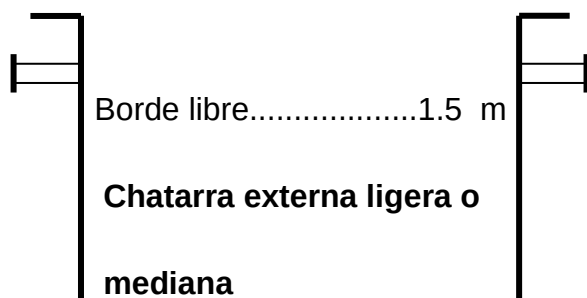
Chatarra externa ligera (2 - 3 t)

CESTA # 2



Chatarra externa ligera (2 - 3 t)

CESTA # 3



Chatarra externa ligera (2 - 3 t)

CARGA TOTAL.....67 - 75 t.

Anteriormente, se utilizaba chatarra de acero al carbono con especificaciones de calidad en sus dimensiones de 800 x 500 x 500 mm; la chatarra fragmentada su tamaño es inferior 300 mm.

Se procesaron inicialmente 7 coladas con diferentes cargas metálicas incluyendo chatarra fragmentada.

Tabla No. 1: Uso de chatarra fragmentada.

Colada	Chat. Import.	Chat. ERMP	Fe Fund.	Cant. Cesta	Chat. Int.	Chat. Total.	Ac. Líq. (t)	Energía. MGW	Rend. Met. %	I/C Ene. KWh/t	Tap-top-tap	Nm3/h O2
5508	31.55	33.75	0	3	7.2	72.5	67.88	31.01	93.63	456.84	91	1019
5509	31.75	30.2	0	3	10.2	72.15	64.21	34.89	89	543.37	89	814
5510	34.2	30.3	3.5	3	4.2	72.2	68.41	33.73	94.75	493.06	103	1027
5511	32.85	35.75	0	3	3.5	72.1	71.36	33.38	98.97	467.77	90	891
5512	32.5	36.5	0	3	3.5	72.5	66.51	32.6	91.74	490.15	92	898

5513	32.45	35.35	0	3	4.25	72.05	75.11	27.81	104.25	370.26	93	786
5514	32.15	35.85	0	3	4	72	65.18	33.21	90.53	509.51	100	1029
Min.	31.55	30.2	0	3	3.5	72	64.21	27.81	89	370.26	89	786
Max.	34.2	36.5	3.5	3	10.2	72.5	75.11	34.89	104.25	543.37	103	1029
Prom.	32.493	33.957	0.500	3.000	5.264	72.214	68.380	32.376	94.696	475.851	94.000	923.429
Total	227.45	237.7	3.5	21	36.85	505.5	478.66	226.63	662.87	3330.96	658	6464

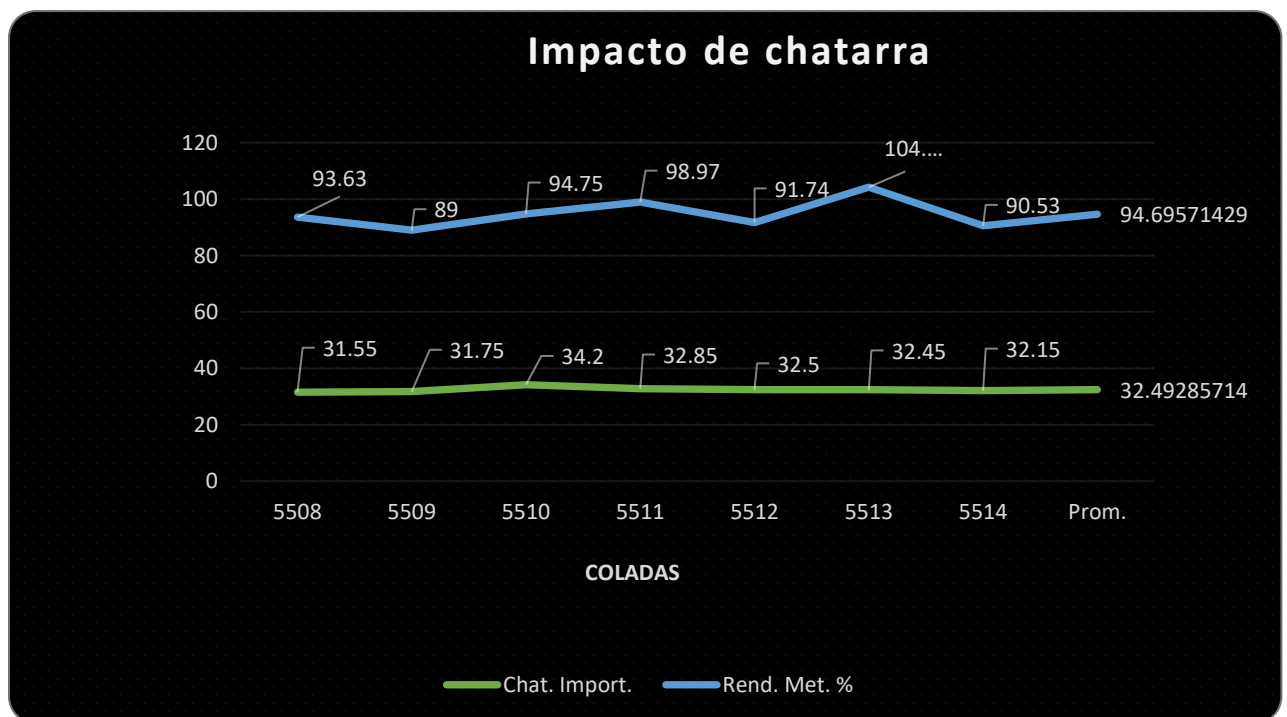


Gráfico 2.1 de consumo de chatarra fragmentada por colada y rendimiento metálico.

2.3.1. Modelación matemática de optimización de procesos mediante el método regresivo

Mediante los modelos de ajuste de tendencia para los datos (X = Cantidad de cestas, Y= Carga metálica, W= Power On, Z= Nm³O₂, Q= Energía) se obtienen ecuaciones con las cuales se realizará las proyecciones de la demanda de energía. Los resultados de este método econométrico, obtenidos en el programa Microsoft Excel, se detallan a continuación:

Tabla 2.1 Datos de las coladas del 2015.

Colada	# de Cesta	Carga	Power On	Nm ³ O ₂	Energía
5508	3	72.5	84	1019	31.01
5509	3	72.15	97	814	34.89
5510	3	72.2	95	1027	33.73
5511	3	72	87	891	33.38
5512	3	72.5	82	898	32.6
5513	3	72.05	74	786	27.81
5514	3	72	90	1029	33.21

Análisis de regresión:

La ecuación de regresión es:

Ecuación de regresión

$$\text{Energía(Q)} = -74.39 + 1.16y + 0.28w - 0.0015z$$

Estadísticas de la regresión

Coeficiente de correlación múltiple	0.966927452
Coeficiente de determinación R ²	0.934948698
R ² ajustado	0.804846094
Error típico	1.030066914
Observaciones	7

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t
Intercepción	-74.39039996	148.5282366	-0.50085022
# de Cesta	0	0	65535
Carga	1.16099138	2.056421147	0.564568878
Power On	0.279565266	0.058494394	4.779351433
Nm3 O2	-0.001494043	0.004583715	-0.325945796

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	30.49949573	7.624873933	7.186241232	0.125870932
Residuos	2	2.122075696	1.061037848		
Total	6	32.62157143			

Considerando que el coeficiente de correlación (R^2) se encuentra dentro del rango de 0.8-1, es decir que existe una correlación fuerte entre las variables descritas, podemos decir que el método regresivo es el más apropiado para pronosticar la demanda energética del Horno de Arco Eléctrico de ACINOX Las Tunas, el cual es significativo porque determinará el déficit existente.

2.4. Ventajas del uso de la chatarra fragmentada

La introducción de la chatarra fragmentada en la carga metálica ha contribuido a mejorar la eficiencia del proceso de elaboración de acero en lo siguiente:

2.4.1. Disminución del índice de consumo de energía eléctrica.

- Tiene una densidad (aparente fue de 0.92 t/m³) más alta que la que posee la chatarra nacional (0.48 t/m³)
- No está acompañada de materiales no metálicos mezclados con la chatarra (tierra, madera, plásticos, etc.)
- Disminuye el porcentaje de óxido de hierro en la escoria (FeO)

2.4.2. No incrementa el índice de consumo de material refractario por lo siguiente:

- Es una chatarra limpia (no hay presencia de tierra no FeO)
- El arco eléctrico

2.4.3. Se reduce el índice de consumo de electrodos.

- Se reduce el índice de consumo de energía eléctrica

- No hay presencia de material no metálico (aislante) en la chatarra
- Se mejora el rendimiento metálico.

2.4.4. Se logra mayor rendimiento metálico.

- Tiene mayor densidad aparente que la que posee la chatarra nacional
- Está libre de materiales no metálicos mezclados con la chatarra (tierra, madera, plásticos, etc.)
- No provoca altos volúmenes de escoria en el HAE

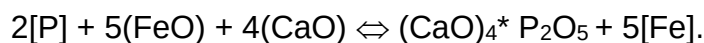
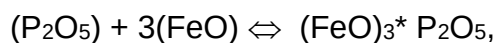
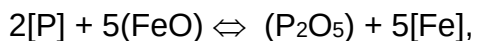
2.4.5. Se disminuye el tiempo de conexión.

- Se reduce el índice de consumo de energía eléctrica
- Tiene mayor rendimiento metálico que la chatarra nacional

2.4.6. Se reduce el consumo de Cal.

- **Al no estar acompañada de materias extrañas la chatarra (tierra, plásticos, madera y otros):** La misma no posee un alto porcentaje de sílice (SiO_2), como sucede con la chatarra nacional, que en nuestro caso según análisis químico realizado esta en el orden del 75 %, el bajo porcentaje de sílice genera que aumente el punto de fusión de la magnesita (MgO) que es el principal componente de los ladrillos refractarios que se emplean en el revestimiento del HAE, disminuyendo así el consumo de estos y de Óxido de calcio, que es el que se utiliza para neutralizar el efecto negativo de la sílice (en otro sentido, la presencia de esta sílice (SiO_2) en la tierra provoca que la actividad del óxido de calcio (CaO) en la escoria sea baja) la baja presencia de la sílice favorece el proceso de desfosforación siendo en el HAE donde único se puede efectuar el mismo en todo el proceso de elaboración del acero según lo describe su mecanismo. Evitando que por cada un porcentaje de tierra en la carga hay que adicionar de 8 a 10 kg/t de cal (CaO).
- **Bajo grado de oxidación de la chatarra:** Esto genera cantidades bajas de óxido de hierro en la escoria (FeO), haciendo que la escoria no sea muy licuada y agresiva para el refractario, evitando así que no penetre en la porosidad de este, reduciendo el consumo del mismo.

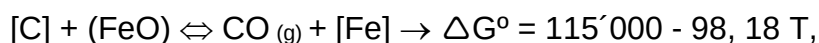
A continuación mostramos el mecanismo de desfosforación:



Como se puede apreciar, por cada molécula de pentóxido de difósforo (P_2O_5) se requieren 4 moléculas de Óxido de calcio (CaO) y por ello es preciso aumentar en la carga del HAE el contenido de Óxido de calcio (cal). Con el uso de la chatarra fragmentada el consumo de Óxido de calcio se reduce, así como el consumo de energía eléctrica.

2.4.7. Se disminuye el consumo de Carbones y Ferroaleaciones.

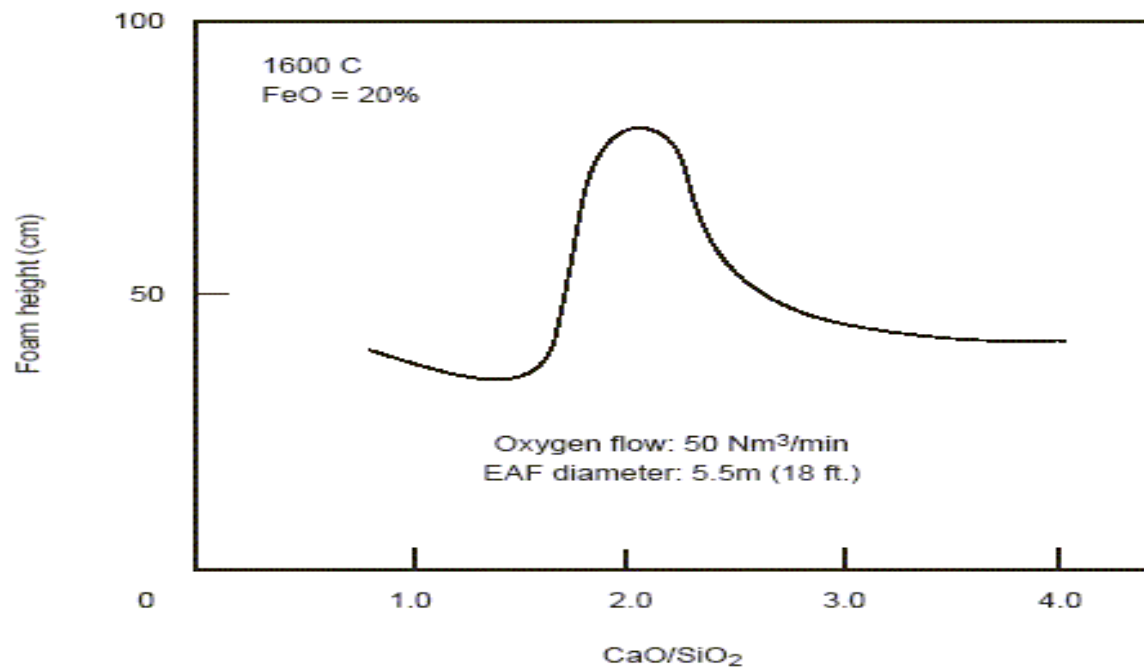
- **Bajo grado de oxidación de la escoria como consecuencia de la carga de chatarra con baja oxidación:** Esto reduce el consumo de carbón, dado por la baja presencia del óxido de hierro (FeO) esto disminuye el efecto diluyente hacia el óxido de magnesio (MgO) del revestimiento refractario del HAE, esto trae como consecuencia la reducción del FeO como se observa en la siguiente ecuación química:



Esto equivale que por cada kilogramo de carbono que se adicione para reducir al hierro, se sobreconsume unos 4.01 kWh/kg "C" a la temperatura metalúrgica de 1600°C.

$$(FeO) + C_{298K} \rightarrow [Fe] + \{CO\} + 4.01 \text{ kWh/ KgC}$$

El óxido de hierro en la escoria del HAE debe estar entre 20-25% para lograr una correcta práctica de escoria espumosa como se puede observar en el siguiente gráfico:



Conclusiones parciales

1. Se disminuye el tiempo de preparación de la carga metálica y se logra mejor acomodamiento de la chatarra dentro de las cestas.
2. La carga metálica total se puede preparar en 2 o 3 cestas.

CAPÍTULO III . ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para un análisis más detallado, se introdujo chatarra fragmentada en la carga metálica en 58 coladas, obteniendo un rendimiento del acero líquido por encima del 90 %, en las condiciones actuales, el consumo de energía eléctrica, se comportó inferior a los 480 kWh/t de acero.

Tabla 3.1 Chatarra Fragmentada.

Pruebas	Total de Col.	% Chat en Cesta	R-M (%)	Energía (KWh/T)
1	2	76	95,25	451
2	19	47	93,04	461
3	37	33	92,56	473
Total	58	39	93,00	469

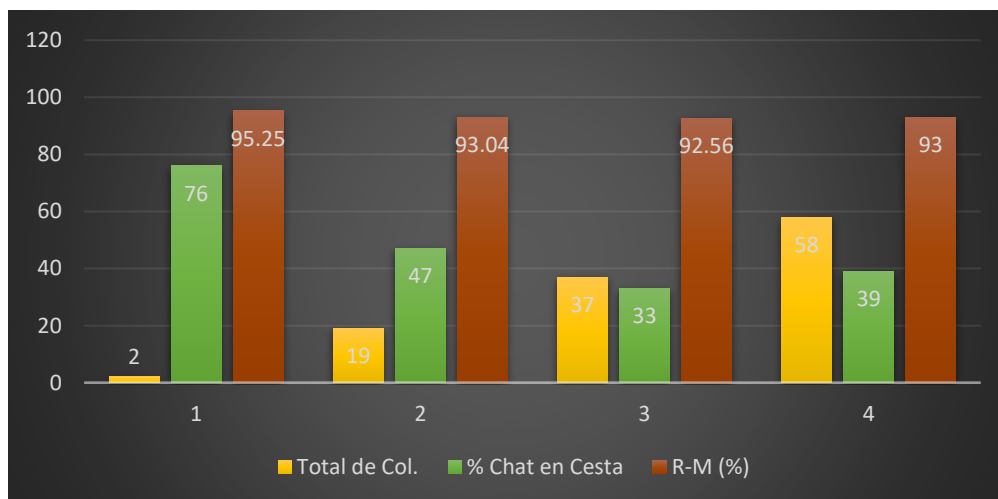


Gráfico 3.1 Porcentaje de chatarra en cesta y rendimiento metálico.

El uso de la chatarra fragmentada nos permite incidir positivamente en la reducción de los consumos de energía, refractario, electrodos y Óxido de calcio, aumentando la

productividad y la eficiencia económica (se evita el pago de materiales no metálicos presente en la chatarra nacional).

3.1. La chatarra que consumimos normalmente es la que se clasifica como HMS 1 por las normas ISRI 201 y 202.

- Densidad aparente entre 0.4 y 0.6 t/m³.
- Contaminada con materiales no metálicos (tierra, plásticos, etc.) y metales no ferrosos.
- Grado de oxidación superior a los 2 mm de espesor.
- La chatarra fragmentada tiene una densidad aparente de 0.92 t/m³, no esta contaminada con materiales no metálicos y su grado de oxidación es muy bajo, inferior a los 1 mm.
- Las materias extrañas (tierra y otros elementos no metálicos) provocan desbalance metálico en el proceso, afecta el rendimiento de la chatarra (rendimiento metálico, materia que no se convierte en acero líquido), aumenta el consumo de energía, refractarios, electrodos de grafito y el tiempo de proceso de elaboración del acero.
- Análisis individual del comportamiento para los principales índices de consumo según las estadísticas obtenidas de las pruebas realizadas con chatarra importada fragmentada con buena calidad.

3.1.1. Uso de la Chatarra Fragmentada limpia.

- Consumos de energía. 475 KWh/t
- Refractario. 6.18 Kg/t
- Consumo de electrodos. 2.4 Kg/t
- Rendimiento metálico. 90 %
- Tiempo de conexión. 75 min
- Consumo de Cal. 35 Kg/t
- Disminución del consumo de Carbón de carga en 3.33 kg/ton

3.2. Resultados obtenidos con el uso de la chatarra fragmentada en nuestra planta.

Partiendo de los siguientes datos primarios del año 2017:

Producción anual de palanquillas.	140'000 t.
Carga de chatarra anual.	161'000 t.
Rendimiento metálico.	87%.
Energía media consumida (chatarra limpia).	485 kWh/ t.
Consumo medio de electrodos (500 mm).	2.4 kg/ t.
Consumo medio de cal.	40 kg/t.
Precio medio de la chatarra (HMS – ISRI 202).	395 usd/t.
Precio medio de la energía eléctrica.	111.68 usd /MWh.
Precio de los electrodos de 500 mm.	4206.36 usd/t.
Precio de la cal.	60 usd/t.

A continuación se muestra el producto terminado:



Figura 3.1 Palanquillas de acero

Fuente: ACINOX Las Tunas.

Las literaturas especializadas plantean que la separación de los materiales no ferrosos presentes en la chatarra (tras su beneficio), oscila entre un 4% – 10% del total de chatarra. Se conoce además que por cada 1% en el incremento del rendimiento metálico, se obtiene una disminución en el consumo de cal entre 1.5 – 2.0 kg/ton y de 6 – 8 kWh/ton de energía eléctrica.

Mediante acuerdos tomado entre las Empresas de Recuperación de Materias Primas y Acinox Las Tunas recogido en Contrato, se ha fijado la presencia de materiales no metálicos en un 4 %, en cada medio de transporte, al estar la chatarra fragmentada libre de estos y utilizándola mezclada con la chatarra nacional, la no presencia de un 4% de los materiales no ferrosos presentes en la chatarra, equivale a reducir 6 kWh/t de energía eléctrica de ahorro y 1.5 kg/ton de ahorro de cal (estos dos al incrementarse en 1% el rendimiento metálico de la chatarra cargada al HAE):

Material no ferroso separado (A): 4% de 4141.200 t = 165.650 t.

Producción realizada (B):.....3602.840 t palanquillas.

Carga de chatarra mezclada limpia (C):4141.200 t – 165.650 t = 3975.550 t.

Rendimiento metálico luego de realizada la limpieza (D):(3602.000 / 3975.550) * 100 = 90.62 %.

Rendimiento metálico en condiciones normales (E): 87.00%.

Incremento del rendimiento metálico (F): 3.62 %.

3.2.1. Energía eléctrica

El ahorro de energía eléctrica, está dado por el incremento que se obtiene en el rendimiento metálico tras la limpieza de la chatarra:

Ahorro de energía = $3.62 * 6 = 21.72$ kWh/t.

Por tanto, el índice de consumo de energía eléctrica es: $485 \text{ kWh/t} - 21.72 \text{ kWh/t} = 463.28 \text{ kWh/t}$.

El ahorro de energía es: $21.72 \text{ kWh/t} * 0.111 \text{ usd} = 2.41 \text{ usd}$.

El ahorro anual de energía por esta causa sería de: $21.72 \text{ kWh/t} * 3602.840 = 78253.68 \text{ kWh}$.

$78253.68 \text{ kWh} * 0.111 \text{ usd/kWh} = 8686.16 \text{ usd}$.

También es conocido por la literatura especializada que por cada recarga adicional que se realice al HAE, se perderá entre 350 kWh y 600 kWh. Partiendo de la estadística ACINOX nuestra que el 53% de las coladas (2017) se tuvo que realizar una recarga adicional y siendo conservador tomaremos 350 kWh de pérdida por recarga extra:

Para la producción de las 3602.840 toneladas en este periodo se requerirían: 3602.840 t/año / 60 t/col = 58 col.

Por tanto: $58 \text{ col} * 53\% / 100\% = 30.54 \text{ col}$ con recargue adicional.

El consumo de energía eléctrica adicional por esta causa sería: $30.54 \text{ col} * 350 \text{ kWh/col} = 10689 \text{ kWh}$.

$10689 \text{ kWh} * 0.111 \text{ usd/kWh} = 1186.48 \text{ usd}$.

3.2.2. Electrodo de 500 mm

Si referimos el consumo de electrodos (chatarra sin limpiar) con el índice de consumo de energía eléctrica se obtiene la siguiente relación:

Consumo de electrodo $[2.40 \text{ kg/ton}] / [485 \text{ kWh/ton}] = 0.005 \text{ kg/kWh}$.

Teniendo en cuenta que se ahorran 138532.68 kWh. El ahorro producto de un menor consumo de energía eléctrica sería:

Ahorro anual: $0.005 \text{ kg/kWh} * 138532.68 \text{ kWh} = 692.66 \text{ kg}$.

$0.692 * 4'206.36 \text{ usd/ton} = 2910.8 \text{ usd}$.

El ahorro total deducible de forma directa sería de: 18287.93 usd.

Esto equivale a un ahorro de: 5.07 usd/t.

Conclusiones parciales

El control preciso de la composición química y las impurezas presentes en la carga metálica garantizó la producción de aleaciones de alta calidad y cumplió con los estándares de la industria; podemos afirmar que la chatarra fragmentada tanto sola, como mezclada con la chatarra nacional aporta muy buenos resultados.

1. Con el uso de la chatarra fragmentada se logran disminuir los principales índice de consumo en el HAE.

- Consumos de energía. 466 KWh/t

- Rendimiento metálico. 93 %
 - Tiempo de conexión. 75 min.
2. Es una chatarra con un buen rendimiento debido a que la misma tiene una densidad mayor que la chatarra nacional y la importada y se encuentra libre de materias extrañas.

Conclusiones Generales

El estudio de la carga metálica empleada en el horno de arco eléctrico de ACINOX Las Tunas es crucial para avanzar hacia una economía circular y sostenible, donde el reciclaje de metales desempeña un papel fundamental en la gestión responsable de los recursos y la reducción de la huella ambiental de la industria metalúrgica.

1. Se disminuye el tiempo de preparación de la carga metálica y se logra mejor acomodamiento de la chatarra dentro de las cestas.
2. La carga metálica total se puede preparar en 2 o 3 cestas.
3. Es una chatarra con un buen rendimiento debido a que la misma tiene una densidad mayor que la chatarra nacional y la importada y se encuentra libre de materias extrañas.

Recomendaciones:

1. Se debe lograr la adquisición de mayores cantidades de este tipo de chatarra de manera que nos permita trabajar con más estabilidad de la misma.
2. Se debe suministrar independiente de la chatarra HMS 1 según las normas ISRI 201 y 202, de manera que permita un mayor aprovechamiento de la misma y al mismo tiempo lograr un mayor control.
3. Al confeccionar la carga metálica se debe cuantificar las toneladas de este tipo de chatarra introducida en las cestas, aun cuando se suministre mezclada con otro tipo de chatarra.

Bibliografía

Inc. (ISRI). (2014). *Institute of Scrap Recycling Industries*.

American Iron and Steel Institute (AISI). (2022).

B, B., & K, K. (2011). *Arc Furnace Physics*. Dusseldorf: Stahleisen.

B, L., A, S., & A, K. (2014). *Metalurgia de metales no ferrosos*. Moscú: MIR.

Empresa ACINOX Las Tunas. (n.d.). Retrieved junio 20, 2024, from
<http://www.acinoxtunas.co.cu>

European Commission . (2014). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production*.

George, F., & Alvin. (2018). *Recycling of Metals and Engineered Materials*.

International Nickel Study Group. (2018). *Reciclaje e innovación*. New York.

Katz, M. (2011). *Minerales de hierro*. Buenos Aires.

RECICLAJES OLMEDO SL. (2020).

Reck, B., & K. et al. (2008). *Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis*.
Environmental Science Technology. doi:5797-5803

Resources, Conservation and Recycling. (n.d.). *Reciclaje del aluminio*.

Tzimas, E. (2007). *The role of metals in the European energy system* (tercera ed.).
Conservation and Recycling.

Wang, C., Zhang, Y., & Wang, Y. (2021). *Optimization of Electric Arc Furnace
Steelmaking Process Based on Improved Grey Wolf Optimization Algorithm*.
Mathematical Problems in Engineering.

Waster Management. (n.d.). *Chatarra*.

World Steel Association. (2018). *Steel Recycling in Figures*.

Y, T. (2013). *Innovation in electric arc furnaces*. Place of publication not identified: Springer.

Anexos



Anexo 1. Obreros trabajando en el HAE.



Anexo 2. Apertura de la piqueta del Horno.



Anexo 3. Proceso de vertido del acero líquido del Horno hacia la cuchara.



Proceso de vaciado de palanquillas por dos líneas

Anexo 4. Proceso de vaciado de palanquilla por dos líneas.