

**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 MÁQUINA INYECTORA**

**LISETTE ZAYURI CAMACHO MATEUS
CÉSAR RODRÍGUEZ PÉREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2005

**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 MÁQUINA INYECTORA**

**LISETTE ZAYURI CAMACHO MATEUS
CÉSAR RODRÍGUEZ PÉREZ**

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Metalúrgico**

TUTOR

Universidad Industrial de Santander, UIS

GUSTAVO NEIRA

Ph.D. Ingeniero Metalúrgico

CO-TUTOR

Acerías Paz del Río S.A.

LUIS PINZÓN

Ingeniero Metalúrgico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS – FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2005

DEDICATORIA

A Dios, quien ha iluminado un camino lleno de adversidades y gratas experiencias, por darme la oportunidad de momentos inolvidables y colmarme de esperanzas para enfrentar un futuro.

A mis padres Nelson Alberto y Mary Leila, por el amor que me profesan, por sus enseñanzas, dedicación, apoyo incondicional y por creer en mí haciendo de mis sueños una realidad.

A mis hermanos Milena, Zulay, Wilmar y Edwin, por estar siempre a mi lado brindándome compañía y cariño.

A mis sobrinos Miguel Ángel, Natalia y Juan Sebastián, por su alegría y por ser la fuente de mi inspiración.

A mis abuelitos Roque Julio y Ernestina, por sus sabios consejos, amor, ternura y compañía.

A César, por su amor, compañía, paciencia, dedicación y entrega en la realización de nuestro proyecto.

A mi familia y amigos, por su colaboración y apoyo en todo momento.

Lisette zayuri

DEDICATORIA

A Dios, que ha iluminado mis senderos y me ha llevado de su mano para conseguir uno a uno cada sueño culminado.

A mis padres, los seres mas especiales y maravillosos que cimentaron en mi unas bases sólidas y depositaron toda la confianza necesaria para mantenerme firme en cada una de las adversidades que en el transcurrir del tiempo han acechado mis caminos.

A mis hermanos Diana, Carlos y Ricardo, que han estado presentes en todos y cada uno de los pasos y sueños perseguidos, porque han atado a mi corazón cariño y lealtad verdaderos.

A Laura Camila y Diana Carolina que con su sonrisa e inocencia me contagian de energía y deseo para fortalecer mi alma, y a toda mi familia que de una u otra forma fraguaron con el vestigio de su incansable trabajo un patrón de vida digno de imitar.

A Lisete Zayuri mi fiel compañera que ha compartido mis triunfos y derrotas.

Cesar Rodriguez

AGRADECIMIENTOS

A la familia Rodríguez Pérez, por su hospitalidad, amistad, cariño y colaboración.

Al Doctor Gustavo Neira, director de este proyecto, por su valiosa colaboración y por brindarnos su amistad.

A cada uno de los miembros que hacen parte de la ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES por haber contribuido a nuestra formación académica, profesional y personal.

Al Ingeniero Luis Pinzón, codirector de este proyecto, por apoyar nuestro trabajo y por la gestión realizada.

Al Ingeniero Miguel Roldán, Ingeniero electrónico ACPR. S.A. por su gran entusiasmo y colaboración.

A la empresa Acerías Paz del Río, S.A. por permitirnos afianzar nuestros conocimientos

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	3
1.1. Objetivo General	3
1.2. Objetivos Específicos	3
2. GENERALIDADES	4
3. EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ACERO EN LA PLANTA HORNO ELÉCTRICO DE ACERÍAS PAZ DEL RÍO S.A.	5
3.1. Descripción de la Instalación	5
3.1.1. Componentes y estructura del horno.	6
3.1.2. Descripción del horno.	8
3.2. Proceso Básico con dos Escorias	11
3.2.1. Cargue del horno.	12

3.2.2. Fusión de la carga.	12
3.2.3. Descripción de las fases del proceso de fusión.	12
3.2.4. Descripción de las fases del proceso de afino.	14
3.2.5. Colada.	16
3.2.6. Acondicionamiento del horno.	16
3.3. Generalidades del Proceso Tradicional	16
3.3.1. Fundamentación teórica.	17
4. SEGUIMIENTO DE LA OPERACIÓN TRADICIONAL EN EL HORNO ELÉCTRICO	25
4.1. Consumo de Energía	31
4.2. Tiempo de Operación	32
4.3. Consumo de Carburante	32
4.4. Consumo de Cal	33
4.5. Consumo de Electroodos y Niples	33
4.6. Consumo de Refractarios	33
4.7. Caracterización de Escorias y Antracita	34
5. PRINCIPIOS SOBRE LA ESCORIA ESPUMOSA	37
5.1. Formación de la Escoria Espumosa	37
5.1.1. Mecanismo de formación de la escoria espumosa.	37
5.1.2. Proceso desarrollado con escoria espumosa.	37
5.2. Interacción Arco – Escoria	39
5.2.1. Arco descubierto.	40

5.2.2. Arco semi-sumergido.	40
5.2.3. Arco sumergido.	40
5.3. Estructura y Propiedades de las Escorias	40
5.3.1. Generalidades.	40
5.3.2. Estructura de las escorias	41
5.3.3. Propiedades de las escorias.	43
6. EQUIPO A UTILIZAR PARA LA FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA	46
6.1. Descripción y Partes de la Máquina Inyectora .	46
6.1.1. Sistema de cargue del silo de almacenamiento.	47
6.1.2. Sistema de control de la máquina.	48
6.2. Inspección y Ajustes a la Máquina Inyectora	49
6.3. Descripción Técnica	50
6.4. Manual de Operación de la Máquina Inyectora	52
6.4.1. Funcionamiento de la máquina.	53
6.5. SÍNTESIS DE OPERACIÓN DE LA MÁQUINA	55
6.6. Mantenimiento	57
6.7. Mantenimiento diario	57
6.8. Posibles Fallas De La Máquina Inyectora	58
6.8.1. El motor no arranca.	58
6.8.2. El rotor no gira.	59
6.8.3. Taponamientos.	59
7. DISEÑO EXPERIMENTAL	60

7.1. Desarrollo del Diseño Experimental	64
7.2. Diseño para la Variable Consumo de Energía (Kwh/Ton.Ch) (Y1)	67
7.2.1. Análisis estadístico.	68
7.2.2. Adecuación y ajuste del modelo.	76
7.2.3. Modelo de regresión.	84
7.3. Diseño para la Variable Tiempo Neto de Operacion (Min.) (Y2)	89
7.4. Conclusiones Generales del Diseño Experimental	96
8. MARCHA GENERAL PARA LA FABRICACION DE ACERO EN EL HORNO ELECTRICO DE ARCO CON FORMACION DE ESCORIAS ESPUMOSA	98
9. SEGUIMIENTO DEL PROCESO DE FUSIÓN CON FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA	100
9.1. Caracterización de Muestras de Escorias	106
10. ANÁLISIS DE RESULTADOS	108
10.1. Comparación Cuantitativa de Resultados	108
10.1.1. Consumo de energía.	108
10.1.2. Tiempo de operación.	109
10.1.3. Consumo de antracita.	109
10.1.4. Consumo de cal.	110
10.1.5. Consumo de electrodos.	110
10.1.6. Consumo de masas refractarias.	110
10.2. Estudio Economico	111
10.2.1. Costos unitarios.	111
10.2.2. Costos totales.	112
10.2.3. Beneficio económico.	113

11. CONCLUSIONES	114
11. RECOMENDACIONES	116
BIBLIOGRAFIA	117
ANEXOS	119

LISTA DE GRAFICAS

GRAFICA 1.PRINCIPIOS DE LA ESCORIA ESPUMOSA	38
GRAFICA 2: GRAFICA DE LA EFICIENCIA DE LA TRANSFERENCIA ENERGÉTICA MEDIANTE ARCO	39
GRAFICA 3. DIAGRAMA DE OPERACIÓN DE LA MÁQUINA INYECTORA	52
GRAFICA 4: GRÁFICA VISTA GEOMÉTRICA	63
GRAFICA 5. GRÁFICA ANÁLISIS EXPLORATORIO DEL CONSUMO DE ENERGÍA	69
GRAFICA 6. PRUEBA GRÁFICA DE NORMALIDAD	70
GRAFICA 7. GRÁFICA DE PROBABILIDAD NORMAL	72
GRAFICA 8. GRÁFICA DE RESIDUALES CONTRA VALORES DE ENERGÍA	75
GRAFICA 9. GRÁFICA DEL ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LA TRANSFORMACIÓN LOGARITMO NATURAL	78
GRAFICA 10. GRÁFICA DEL ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LA TRANSFORMACIÓN RAÍZ CUADRADA	78
GRAFICA 11. GRÁFICA DEL ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LA TRANSFORMACIÓN INV. DE LA RAÍZ CUADRADA	79
GRAFICA 12. GRÁFICA DE PROBABILIDAD NORMAL DEL INV. DE LA RAÍZ CUADRADA DE LA ENERGÍA	80
GRAFICA 13. GRÁFICA DE RESIDUALES CONTRA INV. DE LA RAÍZ CUADRADA DE LA ENERGÍA	82

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. CONSUMO ENERGÍA EN COLADAS PRODUCIDAS POR EL PROCESO TRADICIONAL	26
TABLA 2. CONSUMO ENERGÍA RESPECTO A LA CHATARRA Y AL ACERO EN PALANQUILLA PRODUCIDO	28
TABLA 3. TIEMPOS DE OPERACIÓN EN ETAPAS DE FUSIÓN Y AFINO	30
TABLA 4. COMPOSICIÓN DE ESCORIAS EN ETAPA DE FUSIÓN/OXIDACIÓN OBTENIDAS POR EL PROCESO TRADICIONAL (SIN ESCORIA ESPUMOSA)	35
TABLA 5. AGRUPAMIENTO DE SILICATOS COMPLEJOS	42
TABLA 6. NOTACIONES PARA LOS TRATAMIENTOS DEL DISEÑO 2 ³	64
TABLA 7. VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE LAS VARIABLES INFLUYENTES EN EL PROCESO DE FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA	66
TABLA 8. RESULTADOS DEL CONSUMO DE ENERGÍA	67
TABLA 9. VALORES DE ENERGÍA Y SUS RESIDUALES	73
TABLA 10. VALORES DE ENERGÍA TRANSFORMADOS	76
TABLA 11. VALORES DEL INVERSO DE LA RAÍZ CUADRADA DE LA ENERGÍA Y SUS RESIDUALES	81
TABLA 12. RESULTADOS DEL TIEMPO DE OPERACIÓN	89
TABLA 13. CONSUMO DE ENERGÍA IMPLEMENTANDO LA FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA	100
TABLA 14. CONSUMO DE ENERGÍA RESPECTO A LA CHATARRA Y ACERO EN PALANQUILLA PRODUCIDO IMPLEMENTANDO LA FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA	102
TABLA 15. TIEMPOS DE OPERACIÓN EN ETAPAS DE FUSIÓN	103
TABLA 16 CONSUMO DE INSUMOS	106
TABLA 17. MUESTRAS DE ESCORIAS TERMINADA LA FUSIÓN	107

LISTA DE FOTOGRAFIAS

FOTOGRAFÍA 1. HORNO ELÉCTRICO ACERÍAS PAZ DEL RÍO S.A.	6
FOTOGRAFÍA 2: MÁQUINA INYECTORA DE ANTRACITA SEMIATOMATIZADA	46
FOTOGRAFÍA 3: TOLVA DE ALMACENAMIENTO	55

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A DIAGRAMA DE FLUJO DE LA ACERIA PAZ DEL RIO	120
ANEXO B VISTA FRONTAL DEL HORNO DE ACERIAS PAZ DEL RIO	121
ANEXO C VISTA LATERAL DEL HORNO DE ACERIAS PAZ DEL RIO	122

TITULO: IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA EN EL HORNO ELÉCTRICO DE ARCO TRIFASICO DIRECTO, REVESTIMIENTO BASICO DE ACERIAS PAZ DEL RIO S.A. MEDIANTE EL USO DE UNA MAQUINA INYECTORA.¹

AUTORES: Lisette Zayuri Camacho Mateus, Cesar Rodriguez Perez.**

PALABRAS CLAVES: Escoria espumosa, Maquina Inyectora, Fusión, Horno Eléctrico, Desulfuración y Defosforación.

RESUMEN

Ante el creciente desarrollo de las técnicas para la fabricación de acero que conllevan a una mayor rapidez en los procesos, reducción de costos y por consiguiente un aumento en la producción, se hace necesario que todas las empresas siderúrgicas en el país pongan a su disposición estas nuevas técnicas. Una de estas técnicas es la formación de escoria espumosa desde el inicio del periodo de fusión durante la fabricación de acero en los hornos eléctricos de arco.

Este trabajo describe detalladamente como se llevó acabo la formación de escoria espumosa en el horno eléctrico de arco trifásico revestimiento básico de Acerías Paz del Río S.A. una de las siderúrgicas con mayores perspectivas en el país y a nivel latinoamericano.

El horno empleado para el desarrollo del proyecto posee una capacidad teórica de 40 toneladas por colada, y la espumación de la escoria fomentada desde la etapa de fusión se logró gracias a la inyección simultánea de oxígeno y a la proyección de un carburante granulado en la interfase escoria – metal, mediante el uso de una máquina inyectora. Los análisis comparativos hechos a los seguimientos de los procesos nos muestran los excelentes resultados obtenidos con la implementación del proceso mediante la formación de escoria espumosa.

¹ Proyecto de Grado modalidad práctica Empresarial Industrial realizada en Acerias Paz del Rio S.A.

** Facultad de Ingenierías Físico – Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Universidad Industrial de Santander. Tutor Ing. Luis Pinzon (Acerias Paz del Rio S.A.), CoTutor PhD Gustavo Neira (UIS).

TITLE: PROCESS IMPLANTION OF FORMATION OF FOAMY SLAG IN THE ELECTRIC FURNACE OF DIRECT ARCH THREE PHASE, BASIC COATING OF ACERIAS PAZ DEL RIO S.A. THROUGH USE OF A INYECTOR MACHINE.²

AUTHORS: Lisette Zayuri Camacho Mateus, Cesar Rodriguez Perez.**

KEYS WORD: Foamy Slag, Injector Machine, Fusion, Electric Furnace, Desulfuration, Dephosforation.

SUMMARY

On account of the growing development of the techniques for the steel production that they bear to a bigger speed in the processes, reduction of costs and consequently an increase in the production, becomes necessary that all the steel companies in the country put these new techniques at your disposal. One of these techniques is the formation of foamy slag from the beginning of the period of coalition during the steel production in the electric ovens of arch.

This work describes detailedly like it was taken I put an end the formation of foamy scum in the electric furnace of arch three-phase basic lining of Acerías Paz del Río A.S. one of the steel plants to more perspectives in the country and at Latin American level.

The oven used for the development of the project possesses a theoretical capacity of 40 tons for laundry, and the of the foaming scum fomented from the coalition stage it was achieved thanks to the simultaneous injection of oxygen and to the projection of a fuel granulated in the interface scum - metal, by means of the use of a injector machine. The analyses comparative facts to the pursuits of the processes show us the excellent results obtained with the implementation of the process by means of the formation of foamy slag.

² Graduation Work way Industrial Practice at Acerias Paz del Rio S.A:

** Facultad de Ingenierías Físico – Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Universidad Industrial de Santander. Tutor Ing. Luis Pinzon (Acerias Paz del Rio S.A.), CoTutor PhD Gustavo Neira (UIS).

INTRODUCCIÓN

En el proceso de fabricación de acero se eliminan impurezas en forma de escoria, esta escoria está compuesta generalmente por óxidos, los cuales en los procesos de afino para la obtención del acero son principalmente: CaO, MgO, Al₂O₃, SiO₂, FeO, MnO, P₂O₅.

Aplicando la ultra alta potencia en los hornos eléctricos y usando factores de potencia altos, la fabricación de acero se ha intensificado notablemente. No obstante, al utilizar esta técnica los voltajes más altos y la máxima longitud del arco conlleva un desgaste acelerado del revestimiento del horno; para limitar este inconveniente y aprovechar en la mejor forma posible la energía del arco, se ha estudiado el uso de la técnica de escoria espumosa.

La escoria espumosa en sí es la misma escoria que normalmente se utiliza para la fabricación de acero, pero ésta se logra con la inyección simultánea de oxígeno y un carburante, que en este caso es antracita, en la interfase escoria-acero líquido.

En el desarrollo de esta práctica industrial, se ensayó la formación de escoria espumosa durante la etapa de fusión en el horno eléctrico de arco trifásico directo, revestimiento básico de Acerías Paz del Río S.A. mediante el uso de una máquina inyectora de antracita.

El horno eléctrico de arco de Acerías Paz del Río S.A, de marca LECTROMELT, es usado en la fabricación de acero y tiene una capacidad instalada de 40 toneladas por colada. El horno cuenta con una máquina inyectora que actualmente

no está siendo utilizada, la cual puede ser empleada para la formación de escoria espumosa. Teóricamente con la implementación de la escoria espumosa se puede llegar a aprovechar al máximo la energía de arco, obteniendo resultados benéficos durante el proceso de fusión en la producción de acero.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

- Implementar el 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 máquina inyectora.

1.2. Objetivos Específicos

- Poner en funcionamiento la máquina inyectora y de esta forma utilizarla en el proceso de formación de escoria espumosa.
- Hacer y aplicar una marcha específica de formación de escoria espumosa en el proceso de fabricación de acero en el horno eléctrico.

2. GENERALIDADES

En la actualidad, se construyen hornos eléctricos con tres sistemas de calentamiento, por resistencias, por arco y por inducción. Los hornos eléctricos de arco se calientan por el arco eléctrico que salta en el interior del horno entre electrodos dispuestos para este fin.

Para la obtención y refusión del acero solo se emplean los hornos de arco y los de inducción, en los que pueden alcanzarse temperaturas hasta de 3500 °C. Los hornos eléctricos, tanto los de arco como los de inducción, tienen ventajas sobre otros hornos como son: obtención de temperaturas muy elevadas, control de velocidad de elevación de temperaturas, carga menos contaminante.

Los hornos eléctricos de arco trifásico, son los más empleados. Están formados por una cuba de acero de forma cilíndrica, recubierta interiormente por un revestimiento refractario.

Los electrodos de los primeros hornos de arco eran de carbón amorfo, pero actualmente se utilizan de grafito preparados artificialmente, con bajo contenido de cenizas y alquitrán, grafitizados a 2200 °C. Los electrodos se consumen en parte por combustión y en parte por volatilización del carbono.

Los hornos eléctricos de arco tienen una enorme flexibilidad en cuanto al empleo de materias primas para la fabricación del acero. Además se emplean para la fabricación de aceros fuertemente aleados, de imposible o muy difícil producción en otros tipos de hornos, salvo el de inducción.

3. EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ACERO EN LA PLANTA HORNO ELÉCTRICO DE ACERÍAS PAZ DEL RÍO S.A.

3.1. Descripción de la Instalación

El horno eléctrico de Acerías Paz del Río está ubicado en la división acería dentro de la cual también se encuentra: Convertidores, Colada, y además una serie de plantas auxiliares tanto para la reparación de materias primas, como para el procesado de residuos y mantenimiento de equipos (ver Anexo A).

Taller de revestimientos. Prepara mezclas refractarias y hace los revestimientos en cucharas, horno eléctrico y mezclador, utilizando ladrillo refractario.

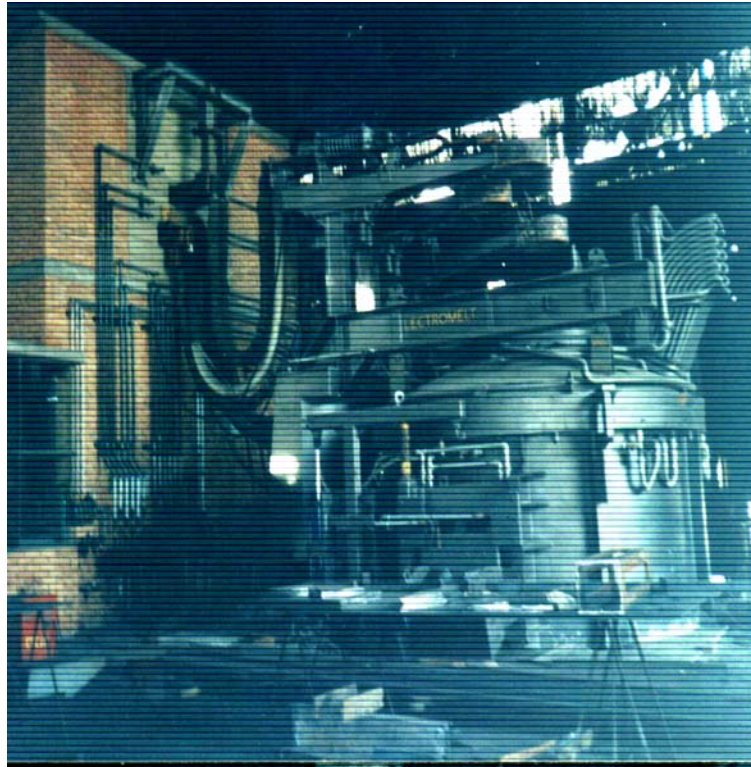
Planta de calcinación. La función de esta planta consiste en transformar la piedra caliza procedente de las minas, en cal siderúrgica para utilizarla en convertidores y el horno eléctrico.

Taller de fundición. La fundición tiene como función básica la fabricación de lingoteras y placas bases en hierro gris, utilizadas como moldes para el acero procedente de los convertidores y del horno eléctrico. Además, se fabrican repuestos con destino a las diferentes dependencias de la empresa.

Dentro de la planta horno eléctrico se encuentra el patio de chatarra, la báscula, tolva de almacenamiento de cal, tolvas para las ferroaleaciones, contenedor de electrodos, cabina de control del horno, máquina inyectora, foso de colado, foso de escorificación.

Adyacente a la cabina de control se encuentran ubicados la sub-estación eléctrica, el transformador y la central hidráulica.

Fotografía 1. Horno eléctrico Acerías Paz del Río S.A.



Fotografía tomada durante el montaje del Horno Eléctrico

3.1.1. Componentes y estructura del horno. El equipo consiste de un Horno de arco eléctrico diseñado para la operación con un transformador de 12.5 MVA, y posee las siguientes características:

Tipo arco de tres fases, tapa giratoria, diseño de cargue por la parte superior con mecanismo de basculación hidráulico. Cables conductores del circuito secundario

refrigerados con agua y cierre tipo delta del secundario refrigerados con agua. Diseño de basculación hidráulico, dispuesto para inclinarse hacia adelante para colada y hacia atrás para desescoriado. Incluye la unidad de poder hidráulico para el funcionamiento del mecanismo de levantamiento y giro de la tapa y para el mecanismo de basculación del horno (Ver anexos B y C).

Al horno se incorpora la plataforma del pistón para el levantamiento de la tapa, que en caso de anclaje a la cuba, produciría deformación de esta.

Las partes del émbolo están protegidas del calor y no están sujetas a la expansión y contracción térmica de la cuba. Esta construcción facilita un amplio levantamiento de las partes basculantes de la cuba y asegura una disipación uniforme del calor alrededor de las paredes laterales.

➤ Partes eléctricas. La conexión del circuito primario del horno está calibrada para una operación desde una fuente de alto voltaje de 13.8 kv, 3 fases, 60 Hz. Se requiere una alimentación de 460V, 3 fases y 60 Hz para la operación de los motores de funcionamiento de la bomba hidráulica y los motores de control de movimiento de las columnas porta electrodos.

Los componentes del sistema conductor secundario entre el transformador del horno y los brazos de potencia son fabricados para adaptarse a las cargas de corriente que se generarán a futuro con un transformador de 40 MVA.

➤ Tamaño y capacidad. La cuba tiene un diámetro interior menor de 3.96 m (13 ft) y un diámetro interior mayor de 4.16 m (13.64 ft). Tiene una capacidad para metal fundido de 42417.02 kg (93513.41 lb) hasta el nivel de la puerta, cuando está provisto de una línea de refractarios de 343 mm (13 ½") de espesor y 737 mm (2ft - 5") de altura.

➤ Instrumentos de medida y control. El horno eléctrico de arco se opera desde un tablero con diferentes tipos de controles, luces indicadoras e instrumentos de medida como amperímetros, voltímetros, watímetros.

Los controles principales regulan la actividad de los motores encargados de subir o bajar los brazos porta electrodos, según la intensidad de la corriente. Para cada electrodo hay un control en forma de perilla que permite el manejo automático o manual de estos motores, además de un control que maneja los tres electrodos simultáneamente.

Se encuentra el interruptor para el intercambiador de taps y reóstatos de regulación para el ajuste de carga de corriente del electrodo en el circuito secundario.

Incluye también relés de protección de elevación de corriente tipo “very inverse time”, para el control de la intensidad. El puesto de control está ubicado en una cabina cerca al horno, protegido por vidrios de seguridad.

3.1.2. Descripción del horno. El horno propiamente dicho está constituido por elementos mecánicos y accesorios.

➤ Cuba. Consiste en un fondo de acero cubierto con material refractario que ayuda a contener el acero líquido y usualmente, una sección superior con paneles refrigerados por agua, que solo entra en contacto con la chatarra y la escoria.

La cuba es de forma ovalada y agujero de colado, la transferencia de acero líquido a la cuchara se hace inclinando el horno y abriendo el agujero de colado en el fondo que permite fluir el acero.

➤ Tapa. Está conformada por dos secciones: el núcleo y el anillo de refrigeración externo. El núcleo o parte inferior está fabricado en material

refractario y posee tres orificios en una configuración de triángulo equilátero formando el círculo de electrodos que permite el paso de ellos en sus movimientos ascendentes y descendentes. El anillo refrigerado soporta este conjunto refractario, este lleva una abertura o chimenea, también refrigerada por agua que permite el paso de los humos y la llama producidos en el horno durante el proceso.

La tapa del horno tiene dos movimientos diferentes, uno arriba-abajo y el otro de desplazamiento lateral. El primer movimiento permite el alce perfecto de la tapa sobre las paredes del horno y el segundo movimiento da paso al cargue de la chatarra dentro del horno; ambos movimientos son ejecutados por acción hidráulica y controlados por unas palancas de acción manual localizadas cerca de la cabina de control del horno.

➤ Electrodo. Se utilizan electrodos de grafito con un diámetro de 16 pulgadas y de longitud 72.5 pulgadas, los cuales se unen unos a otros por medio de piezas llamadas Niples.

Las funciones principales de los electrodos son transportar la corriente, soportar las altas temperaturas producidas por el arco y resistir las difíciles condiciones mecánicas.

➤ Puerta de trabajo. Es un orificio situado en un lado de la cuba por donde se eliminan las escorias, se adicionan materiales, se efectúan reparaciones y se inyecta oxígeno. Posee una tapa refrigerada por agua y su mecanismo de operación es de tipo neumático.

➤ Plataforma de basculamiento. Soporta el conjunto de cuba, tapa y superestructura. Está anclada en dos puntos a los cilindros de basculamiento, y en otros dos a los pivotes de basculamiento, girando apoyada en estos últimos. Está

conformada por una estructura de acero en forma rectangular con vigas de apoyo para la cuba, soporta la camisa del pistón master de levantamiento de la tapa y posee agujeros de paso para las columnas porta electrodo. A nivel de la cuba está cubierta con lámina antideslizante para permitir el trabajo de los operarios.

➤ Superestructura. Cumple varias funciones. Contiene los motorreductores de regulación de las columnas porta electrodos, al igual que los frenos de seguridad para estas, que la atraviesan de forma vertical a través de tres agujeros rectangulares provistos de roldanas para impedir el movimiento transversal de las columnas. Sostiene la tapa del horno y se apoya en el pistón master de levantamiento el cual mueve todo el conjunto. En su parte inferior posee un cilindro hidráulico montado horizontalmente que le imprime el movimiento de rotación al conjunto en el momento del cargue.

➤ Cables Refrigerados. Proveen la única conexión flexible en el circuito secundario. Deben serlo así para permitir el movimiento de los brazos porta electrodos hacia arriba y hacia abajo y permitir el giro de la bóveda y los brazos mismos cuando se carga el horno. Las conexiones desde el delta, que están fuera de la sala de transformador, son blindadas en plata para suplir un contacto limpio para los cables de poder. El cable de poder consiste en un conjunto de alambres de cobre entrelazados formando una estructura cilíndrica, que se suelda a las terminales de cobre en ambos lados. Un forro de caucho alrededor de los cables permite la refrigeración con agua. El forro de caucho está unido a ambos terminales del cable por medio de mordazas en acero inoxidable. La manguera refrigerada es cubierta con una manga protectora que puede estar fabricada de fibra de vidrio, material vulcanizado o fibra de silicona o aluminio.

➤ Brazos Porta electrodo y tubos conductores. Utiliza un brazo que soporta un tubo conductor aislado. El tubo provee la conexión eléctrica entre los cables de poder y la pinza porta electrodo. Este consiste en un tubo de cobre rígido.

Usualmente el tubo conductor está soportado por una o dos conexiones soldadas. Se debe instalar un buen aislamiento entre el tubo y sus soportes para asegurar que el arco no llegue a destruirlo.

➤ Sistema de refrigeración. El sistema consiste en un circuito cerrado que conduce el agua a través de estas piezas sensibles como son: el transformador, los tubos, cables conductores y las pinzas porta electrodo. El agua en el circuito cerrado pasa a través de un intercambiador de calor.

Típicamente el circuito consiste de bombas de entrada, bombas de retorno, filtros e instrumentos de monitoreo. Las piezas sensitivas del equipo normalmente tienen instrumentación para medir la velocidad de flujo y la temperatura del agua de refrigeración.

➤ Sistema hidráulico. Este sistema provee movimiento a casi todos los mecanismos del horno incluyendo el levantamiento/descenso de la tapa, giro de la tapa, basculamiento del horno y movimiento de cualquier sistema auxiliar. Consiste en un reservorio central, filtros, un acumulador, válvulas y tubería.

3.2. Proceso Básico con dos Escorias

Este procedimiento se utiliza para la fabricación de aceros aleados o aceros al carbono de bajo contenido de azufre y fósforo. A continuación se describen las diferentes etapas de esta operación:

3.2.1. Cargue del horno. El horno eléctrico dispone de una bóveda por donde se alimentan las diferentes materias primas, con la ayuda de una cesta de dos mandíbulas. La materia principal utilizada en la producción de acero es la chatarra junto con determinadas cantidades de cal cargadas por medio de una cuba.

A continuación se cierra el horno y se procede a hacer saltar el arco eléctrico, que fundirá la chatarra mediante la alimentación de energía eléctrica en corriente alterna trifásica y tres electrodos de grafito entre los que se hace saltar el arco eléctrico.

3.2.2. Fusión de la carga. Cuando los electrodos entran en contacto con la chatarra y se hace saltar el arco eléctrico, se producen saltos entre los electrodos y la chatarra como consecuencia de los espacios vacíos que se crean al fundirse la chatarra. La aparición del líquido fundido hace que el trabajo entre los electrodos sea más regular.

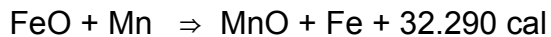
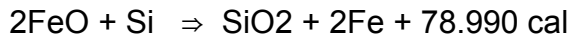
En cuanto se observa la existencia de líquido fundido debajo de los electrodos, debe procederse a la alimentación de cal, para cubrirlo superficialmente y generar la escoria, y de oxígeno puro, mediante un sistema de lanzas que lo inyectan.

3.2.3. Descripción de las fases del proceso de fusión.

➤ Periodo oxidante. En esta fase se produce la oxidación de parte del metal contenido en el líquido fundido. La alimentación de oxígeno al horno de arco eléctrico oxida el hierro contenido en la chatarra según la siguiente reacción química:



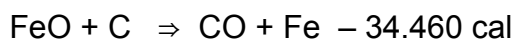
Esta oxidación es la primera en producirse debido a la gran cantidad de hierro presente en la chatarra. A continuación el óxido de hierro oxida al silicio y manganeso según las siguientes reacciones:



Las reacciones de oxidación de hierro, manganeso y silicio son fuertemente exotérmicas, por lo que producen un aumento brusco de la temperatura de fusión, con la consiguiente reducción del consumo energético.

Los óxidos de hierro, manganeso y silicio pasan a formar parte de la escoria que cubre el líquido fundido.

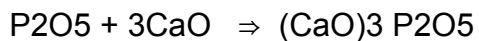
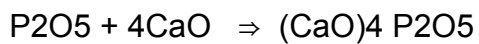
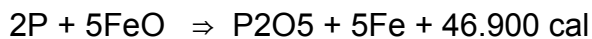
Finalmente, cuando se ha oxidado prácticamente todo el silicio y gran parte del manganeso, la temperatura del líquido fundido ha aumentado considerablemente (1600 °C aproximadamente) y la escoria tiene suficiente porcentaje de FeO libre. La adición de carbón en polvo permite la reducción del FeO presente en la escoria según la siguiente reacción química:



El monóxido de carbono (CO) gas generado al desprenderse del líquido fundido produce lo que se conoce como hervido del baño. El hervido del baño es necesario para uniformizar la composición y temperatura del baño y facilitar la eliminación de gases y reduce el contenido de carbono en el baño.

La reducción de la ebullición del líquido fundido es un indicador de que la mayor parte del carbono se ha oxidado.

➤ Defosforación. La presencia de fósforo es perjudicial porque se presenta disuelto en el líquido fundido y se manifiesta por una gran fragilidad del acero en frío. La defosforación se realiza según las siguientes reacciones químicas:



El fósforo oxidado desaparece del líquido fundido para pasar a formar parte de la escoria.

➤ Desescoriado. Al cabo de cierto tiempo de haber comenzado la oxidación del baño se saca del baño la escoria oxidada negra y con ella gran parte de elementos oxidables.

3.2.4. Descripción de las fases del proceso de afino.

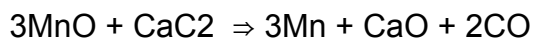
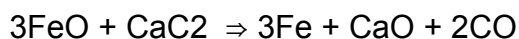
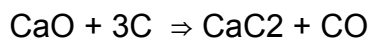
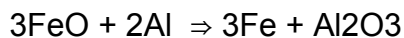
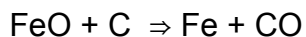
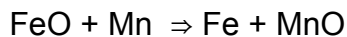
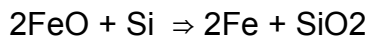
➤ Desoxidación. El líquido fundido procedente del proceso de fusión está muy oxidado por lo que en el proceso de afino se procede a cubrirlo con una escoria fuertemente reductora, formada normalmente por tres partes de cal, una parte de espato-flúor y una parte de coke o grafito.

En esta fase se consigue la desoxidación del líquido fundido, por simple contacto del mismo con la escoria fuertemente reductora. El líquido fundido tiende a oxidar la escoria, y ésta a desoxidar el líquido fundido, por lo que en ese momento la

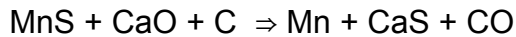
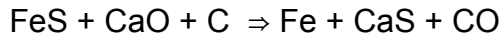
mayor preocupación del encargado del afino es la de mantener la escoria reductora añadiendo el carbono en polvo necesario, ya que supone una garantía de la correcta desoxidación del líquido fundido.

La desoxidación definitiva del acero se consigue cuando se añaden aluminio, ferroaleaciones de silicio y manganeso. Conviene añadir primero el manganeso y luego el silicio. Así se consigue formar en el baño metálico partículas líquidas, primero de óxido de manganeso (MnO) y luego de sílice (SiO₂), que tienen tendencia a conexionarse entre sí dando lugar a partículas de gran tamaño que suben a la escoria.

Con las adiciones se producen las siguientes reacciones:



➤ **Desulfuración.** Esta fase se produce paralelamente a la fase anterior. La desulfuración se produce con el simple contacto del líquido fundido con la escoria reductora, en presencia de una cantidad suficiente de óxido de calcio y carbón según la siguiente reacción:



La desulfuración es más eficaz cuanto más básica sea la escoria y menor sea el contenido de óxido de hierro en la misma.

3.2.5. Colada. Alcanzada la temperatura de colada, se procede enseguida al vaciado del acero en la cuchara, en la que se hacen los ajustes convenientes para lograr la composición química del acero especificado.

3.2.6. Acondicionamiento del horno. Una vez terminada la colada se realiza una inspección visual del horno y se determina si es necesaria la reparación del revestimiento, tanto de la solera, como de las paredes teniendo especial cuidado en la línea de escoria. Se cierra el agujero de colado y se dispone del horno para una nueva carga.

3.3. Generalidades del Proceso Tradicional

Para analizar los resultados obtenidos implementando la formación de escoria espumosa se deben realizar análisis comparativos respecto al proceso tradicional, para así mostrar los resultados que se obtendrán con la implementación de dicho proceso.

Antes de mostrar datos del seguimiento realizado al proceso tradicional, es necesario hacer énfasis en conceptos fundamentales (modo operatorio), para luego mostrar las ventajas que trae la formación de escoria espumosa con respecto a los procesos tradicionales, tal como se observó durante el transcurso del proyecto.

3.3.1. Fundamentación teórica.

- Carga del horno. El proceso de fusión, se inicia con la carga del horno, que consiste en alimentarlo con cal que cumple el papel de fundente y de varias cestas con chatarra hasta completar su capacidad.

El cargue del horno se debe hacer teniendo en cuenta que la chatarra pesada se coloque en la primera cesta, tratando de ocupar área del triángulo formado por los tres electrodos; los trozos pesados se cargan cuidadosamente evitando su caída contra los electrodos durante la fusión, ya que cuando un trozo de chatarra choca contra un electrodo la posibilidad de ruptura de éste es muy alta. La chatarra liviana se cargará alrededor de los trozos grandes para proteger la bóveda y las paredes de la radiación, durante los periodos de máxima potencia para la fusión de la carga.

La chatarra usada en los hornos de arco puede variar en tamaño desde piezas de un metro hasta recortes y virutas. Se debe tener especial cuidado de no cargar la cesta a una altura superior a sus $\frac{3}{4}$ partes, con el fin de que la chatarra no exceda el volumen del horno, lo que conlleva a apisonar la carga y por consiguiente a tener grandes pérdidas de tiempo. Se recomienda balancear las cargas adecuadamente; si se utiliza únicamente carga poco densa, aumenta el número de cargues al horno, y si se utiliza carga densa (pesada) habrá protección insuficiente para los refractarios del horno y un decrecimiento en la vida del revestimiento; por lo anterior se deben dosificar las cargas apropiadamente.

Antes de iniciar la carga, conviene regular la longitud de los electrodos, de tal manera que, en su posición más baja no lleguen a la solera y queden distanciados de ella de modo que el arco no vaya horadando la solera, y al mismo tiempo no queden demasiado cortos.

Después de regular la longitud de los electrodos, se elevan completamente para realizar la carga del horno, y especialmente para que no se rompan durante las manipulaciones.

Se debe cargar cal después de la segunda y cuarta cesta, con el fin de que sirva como fundente y como iniciador de la escoria durante todo el proceso de fusión. El objetivo es llegar al afino con una escoria que no represente mayor efecto sobre los elementos del balance, o en otras palabras que sea levemente básica.

La cal añadida puede ponerse en diversas partes del horno, algunas veces se tiene tendencia a poner toda la cal sobre la solera antes de cargar la chatarra pesada, pero entonces se corre el riesgo de hacer con ello más espeso el revestimiento y de iniciar demasiado tarde las reacciones. En cambio, si se pone en lo alto de la carga, la primera escoria que empieza a formarse en la región baja ataca el revestimiento debido a que tiende a ser baja la basicidad. La mejor solución es repartir la cal regularmente en la carga.

Después de cargado el horno, la piquera se debe reconstruir, preferiblemente con ladrillo de magnesita molido, para evitar que el metal escurra después de fundida la carga; la puerta se cierra y se bajan los electrodos para iniciar la fusión.

➤ Fusión. La fusión se debe hacer en TAP 1, quiere decir iniciar con arco corto, y una vez los electrodos hayan penetrado en la chatarra se debe pasar a TAP 2, arco largo. La fusión de la carga adherida a las paredes se hace mediante la inyección de oxígeno directamente sobre la chatarra, con un tubo de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro.

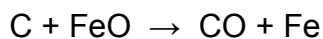
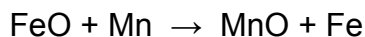
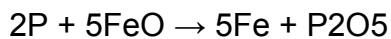
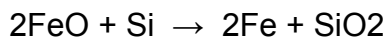
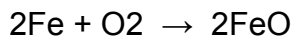
Se debe asegurar que la parte superior de la carga ha ido bajando bien, y no se ha quedado atrapada entre la parte superior del horno y la tapa formando lo que se

denomina bóveda. En caso de formarse esta bóveda conviene destruirla, pues puede no llegar a fundirse o romper algún electrodo al caer.

El oxígeno inyectado, el del aire y el de los gases de la atmósfera normal del horno, oxidan la chatarra fundida formando así los óxidos de los elementos de aleación. El uso de una buena cantidad de oxígeno en la operación de lanza realizará un “hervido” suficiente en la mayoría de los casos para tener un “baño activo”, y el oxígeno reaccionará con el carbono de la carga para formar CO. Esta evolución de gas se conoce como ebullición del carbono.

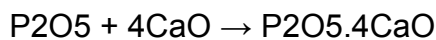
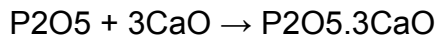
El oxígeno se inyecta en el metal líquido, mediante un tubo o lanza para promover una rápida eliminación del carbono. Dado que el oxígeno aumenta la temperatura del baño, se tiende a favorecer la producción de acero más limpio. Un baño activo caliente y un alto grado de oxidación son necesarios para producir un acero limpio.

➤ Oxidación y defosforación. Formado el charco de metal fundido, el baño empieza a ser oxidado por la acción del oxígeno inyectado y del óxido de hierro de la chatarra. Luego el baño comienza a hervir debido a la oxidación del carbono dando lugar a un desprendimiento gaseoso de CO; al tiempo se va formando cierta cantidad de escoria negra que cubre el baño. La oxidación de los diferentes elementos se realiza de acuerdo con las siguientes reacciones:



El óxido de carbono escapa en forma de gas y quedan los demás óxidos de P, Si, Mn, que son sólidos mezclados entre la escoria y el baño.

En esta fase se elimina el fósforo en la escoria en forma de fosfato tricálcico y tetracálcico, de acuerdo con las siguientes reacciones:



Las temperaturas altas del horno eléctrico hacen favorable la reversión de las reacciones del fósforo en ciertas condiciones, volviendo a quedar este elemento en el baño. Para evitar estas reversiones es necesario mantener la escoria fuertemente básica (alto porcentaje de CaO en ella). Las escorias de baja basicidad presentes a temperaturas superiores a los 1550 °C favorecen la reversión del fósforo de la escoria al baño metálico.

Por las oscilaciones de los amperímetros, o por el ruido regular que producen los arcos, se reconoce que se ha formado un baño líquido debajo de los electrodos.

Cuando en el horno se haya formado un baño líquido representativo, se suele pasar a una tensión más baja y se añade cal si la escoria está demasiado fluida, para permitir una buena defosforación. Cuando por el contrario, la escoria es muy espesa, se añade espato flúor, teniendo cuidado de no abusar del espato pues ello podría ocasionar la fusión de la bóveda del horno que empezaría a gotear.

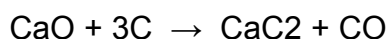
Luego de tener toda la carga fundida, es preciso llevar a cabo la operación de desescoriado con la mayor celeridad para reducir al mínimo el enfriamiento del baño. Hay que verificar que la cuba de escoria este justamente debajo de la piqueta antes de iniciar la apertura del horno y su basculamiento progresivo hasta que el nivel del baño aflore casi al umbral de la puerta. Luego se deja salir la escoria, la cual fluye sola, y después se ayuda o se provoca su salida inclinando más el horno.

Hacia el final del desescoriado sólo queda una débil capa de residuos generalmente muy líquida. Es necesario entonces añadir unas paladas de cal, con lo cual se coagulan los últimos restos de escoria fina, que engruesan y pueden sacarse más fácilmente del horno.

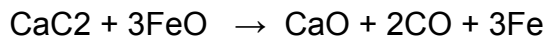
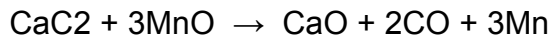
Terminado el desescoriado (de la escoria básica oxidante), se vuelve a poner el horno en su posición normal de trabajo, y se conecta a baja tensión. Se toma una muestra de acero líquido, por medio de una cucharilla, calmando el acero recogido con aluminio y vaciándolo en una pequeña coquilla; luego se enfría la muestra y se envía al laboratorio. Los resultados de las muestras indican la composición química del acero líquido terminada la fusión, indicando elementos tales como manganeso, níquel, cobre, molibdeno, silicio, etc., con los cuales se cuenta para iniciar la etapa de afino.

➤ Aspectos importantes sobre la desulfuración y el afino en Acerías Paz del Río S.A. Se deben tener preparados con antelación, es decir antes de desescoriar, los elementos de la escoria reductora que se va a formar.

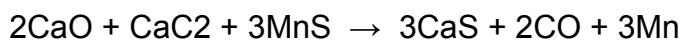
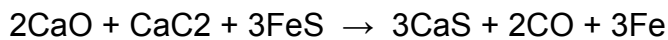
Después de asegurarse que el porcentaje de fósforo y carbono se encuentren dentro de sus respectivos rangos aceptables dependiendo el tipo de acero, se procede a hacer una escoria reductora, adicionando cal, antracita, espato-fluor, aluminio y algo de arena sílice en la piquera para fluidizar la escoria. La antracita y la cal se combinan para formar carburo de calcio a altas temperaturas según la reacción endotérmica:



El carburo de calcio en la escoria reductora es el agente reductor activo, reduce los óxidos de Fe, Mn, Si, etc., y permite que estos elementos regresen al metal líquido en su forma elemental.



La escoria reductora también elimina el azufre del baño como FeS y MnS, la alta temperatura y la agitación del baño ayudan a la captación de azufre del baño por la escoria reductora. Según se reporta en los manuales de operación de la empresa Acerías Paz del Río S.A., además de la reducción de los elementos Fe y Mn, se presentan también las siguientes reacciones bajo escoria reductora, con la participación del CaC₂; Las reacciones principales que ocurren bajo escoria reductora, son en su orden las siguientes:



Es importante no mantener el acero bajo la escoria reductora más de lo necesario. Después de 15 minutos de haber conseguido la escoria reductora, se debe estar vaciando la colada. Este periodo de retención se usa para ajustar la temperatura del metal para el vaciado (1660 °C para aceros de bajo carbono y para aceros sismorresistentes) y permite que los productos de desoxidación (SiO₂, MnO, Al₂O₃, etc.) suban del baño a la escoria.

La adición de ferromanganeso o ferrosilicomanganeso se debe realizar al final del afino haciendo un previo bloqueo con aluminio y manteniendo la escoria reductora. La finalización de la colada bajo una escoria reductora tiene que ver en gran parte con la limpieza relativa y la ausencia de gases en un acero de buena calidad.

➤ **Marcha de la escoria reductora.** La marcha de la escoria consiste en hacer las adiciones deseadas de modo que su fluidez sea siempre la conveniente y que el aclaramiento de su color sea función de la elevación de la temperatura del baño.

Las reacciones químicas se facilitan y aceleran con la fluidez de la escoria; por ello la fluidez debe ser bastante grande, pero sin exceso. El justo medio es una escoria de aspecto cremoso sin contener trozos de cal no digeridos.

La escoria se vuelve esponjosa cuando es muy siliciosa, y la desoxidación se hace más activa, a causa del desprendimiento de CO.

➤ **Adiciones finales.** Las adiciones finales más empleadas son el ferro-silicio y el ferro-manganeso; con ellas se desgasifica el baño, siendo necesario añadir primero el ferro-manganeso que el ferro-silicio, porque la sílice producto de la oxidación del silicio es sólida a la temperatura del acero y queda en forma de inclusiones muy menudas en el metal, mientras que si está en presencia de manganeso, se forma silicato de manganeso líquido que pasa fácilmente a la escoria.

➤ **Colada.** El operador debe comprobar la temperatura del metal antes del vaciado y se debe empezar esta operación después de desconectar la potencia y subir electrodos.

El horno se inclina de tal manera, que la escoria quede retenida sobre el agujero de colada y se permite solamente la salida del metal. Una vez esté todo el metal en la cuchara se deja salir la escoria.

El agujero de colada debe estar limpio para asegurar un buen y rápido vaciado, reduciendo la posibilidad de oxidación y enfriamiento excesivo del metal.

➤ Operaciones complementarias. Una vez vaciado el acero, el horno se lleva a su posición normal y se abre la puerta para hacer inspección al revestimiento. Debido a que la escoria reductora tiene tendencia a corroer el revestimiento, se debe reparar la línea de escoria cada vez que sea necesario.

Los electrodos se inspeccionan y también se agregan nuevas secciones si es necesario. Así mismo, las mordazas deben ser sopladas después de cada colada.

4. SEGUIMIENTO DE LA OPERACIÓN TRADICIONAL EN EL HORNO ELÉCTRICO

Durante el desarrollo del proyecto, se hizo un seguimiento a las variables que pueden afectar tanto técnica como económicamente la operación del horno. Algunas variables se pudieron medir diariamente como el consumo de energía y tiempo de operación. Las demás variables fueron calculadas a partir de sus tasas (índices) de consumo mensualmente.

Las mediciones de las variables fueron realizadas con el propósito de compararlas más adelante con nuevas mediciones de las mismas pero implementando la escoria espumosa. Con el fin de comprobar efectos esperados tales como la disminución de materias primas, consumo de energía y tiempos de operación.

En la Tabla 1, se presentan los valores obtenidos para el consumo de energía en coladas producidas por el proceso tradicional, obtenidos durante un seguimiento al mes de Noviembre del 2004.

Tabla 1. Consumo energía en coladas producidas por el proceso tradicional

Nº COLADA	FUSION (kwh)	AFINO (kwh)	TOTAL (kwh)	CHATARRA (Tn)	PRODUCCION (Tn)
1	23372	4326	27698	40	36.717
2	19606	5960	25566	40	37.515
3	19748	2858	22606	40	37.515
4	24259	3076	27335	40	37.515
5	24832	1049	25881	40	37.515
6	19711	4844	24555	40	37.515
7	19525	4067	23592	40	37.515
8	20104	3802	23906	40	37.515
9	19449	4598	24047	40	37.515
10	21908	3677	25585	37	30.012
11	23558	4877	28435	40	35.400
12	27511	200	27711	38	30.012
13	20875	3052	23927	39	35.400
14	19889	5196	25085	40	36.392
15	19737	2451	22188	39	35.400
16	21289	8451	29740	40	37.515
17	19894	4656	24550	39	37.515
18	19534	5936	25470	40	35.734
19	19572	5284	24856	39	34.380
20	21160	4237	25397	39	34.380
21	25551	3047	28598	40	36.717
22	40261	4190	44451	40	36.392
23	20503	5350	25853	40	37.038
24	18511	6192	24703	40	37.515

25	17969	5345	23314	40	35.734
26	21365	4000	25365	40	37.038
27	21971	3500	25471	40	36.065
28	20532	3381	23913	40	36.392
29	21479	4851	26330	40	37.515
30	20145	3259	23404	43	38.500
PROMED IO	21794	4190.40	25984.40	39.77	36.26

Tabla elaborada por los autores del libro, en base a las hojas de marcha de operación de cada una de las coladas en el horno eléctrico de Acerías Paz del Río S.A.

En la Tabla 2, se presentan los valores obtenidos para el consumo de energía respecto a la chatarra y al acero en palanquilla producido en coladas por el proceso tradicional, obtenidos durante un seguimiento al mes de Noviembre del 2004.

Tabla 2. Consumo energía respecto a la chatarra y al acero en palanquilla producido

EF (kWh/TnC H)	EF (kWh/TnACP)	EA (kWh/TnCH)	EA (kWh/TnACP)	ET (kWh/TnCH)	ET (kWh/TnACP)
584.30	636.54	108.15	117.82	692.45	754.36
490.15	522.62	149.00	158.87	639.15	681.49
493.70	526.40	71.45	76.18	565.15	602.59
606.48	646.65	76.90	81.99	683.38	728.64
620.80	661.92	26.23	27.96	647.03	689.88
492.78	525.42	121.10	129.12	613.88	654.54
488.13	520.46	101.68	108.41	589.80	628.87
502.60	535.89	95.05	101.35	597.65	637.24
486.23	518.43	114.95	122.56	601.18	641.00
592.11	729.97	99.38	122.52	691.49	852.49
588.95	665.48	121.93	137.77	710.88	803.25
723.97	916.67	5.26	6.66	729.24	923.33
535.26	589.69	78.26	86.21	613.51	675.90
497.23	546.52	129.90	142.78	627.13	689.30
506.08	557.54	62.85	69.24	568.92	626.78
532.23	567.48	211.28	225.27	743.50	792.75
510.10	530.29	119.38	124.11	629.49	654.40
488.35	546.65	148.40	166.12	636.75	712.77
501.85	569.28	135.49	153.69	637.33	722.98
542.56	615.47	108.64	123.24	651.21	738.71
638.78	695.89	76.18	82.99	714.95	778.88
1006.53	1106.31	104.75	115.14	1111.28	1221.45

512.58	553.57	133.75	144.45	646.33	698.01
462.78	493.43	154.80	165.05	617.58	658.48
449.23	502.85	133.63	149.58	582.85	652.43
534.13	576.84	100.00	108.00	634.13	684.84
549.28	609.21	87.50	97.05	636.78	706.25
513.30	564.19	84.53	92.91	597.83	657.09
536.98	572.54	121.28	129.31	658.25	701.85
468.49	523.25	75.79	84.65	544.28	607.90
548.53	604.25	105.25	115.03	653.78	719.28

Tabla elaborada por los autores del libro, en base a las hojas de marcha de operación de cada una de las coladas en el horno eléctrico de Acerías Paz del Río S.A.

EF = ENERGIA FUSION

EA = ENERGIA AFINO

ET = ENERGIA TOTAL

La Tabla 3, muestra los valores obtenidos para la variable tiempo de operación en coladas por el proceso tradicional, obtenidos durante un seguimiento el mes de Noviembre del 2004.

Tabla 3. Tiempos de operación en etapas de fusión y afino

TF(min)	TA (min)	TT (min)	DTF	DTA	DTT	TN
175	85	260	35	0	35	225
255	95	350	55	0	55	295
150	30	180	0	0	0	180
185	85	270	15	20	35	235
180	40	220	0	0	0	220
150	40	190	0	0	0	190
145	35	180	0	0	0	180
180	30	210	0	0	0	210
155	50	205	0	0	0	205
165	55	220	15	0	15	205
210	40	250	35	0	35	215
269	121	390	95	60	155	235
200	45	245	30	0	30	215
195	85	280	0	0	0	280
190	45	235	40	0	40	195
540	60	600	345	0	345	255
155	45	200	0	0	0	200
195	40	235	0	0	0	235
170	40	210	0	0	0	210
195	40	235	0	0	0	235
305	65	370	100	40	140	230
185	40	225	0	0	0	225
168	77	245	10	0	10	235
165	50	215	10	0	10	205

170	40	210	0	0	0	210
208	87	295	30	0	30	265
254	36	290	145	0	145	145
190	40	230	20	0	20	210
185	40	225	80	0	80	145
220	40	260	45	0	45	215
203.63	54.03	257.67	36.83	4.00	40.83	216.83

Tabla elaborada por los autores en base a las hojas de marcha de operación de cada una de las coladas en el horno eléctrico de Acerías Paz del Río S.A.

TF = TIEMPO FUSION

DTA = DEMORAS TIEMPO AFINO

TA = TIEMPO AFINO

DTT = DEMORAS TIEMPO TOTAL

TT = TIEMPO TOTAL

TN = TIEMPO NETO

DTF = DEMORAS TIEMPO FUSION

4.1. Consumo de Energía

Los promedios de consumo de energía durante las etapas de fusión y afino, determinados durante un seguimiento al mes de Noviembre del año 2004, fueron los siguientes:

Energía de fusión: 21794 kWh

Energía de afino: 4190.4 kWh

Energía total: 25984.4 kWh

Por otra parte, los promedios de consumo de energía respecto al peso de chatarra cargada y al acero producido fueron:

Energía de fusión: 548.53 kWh/Tn. Chatarra
604.25 kWh/Tn. Acero producido
Energía de afino: 105.25 kWh/Tn. Chatarra
115.03 kWh/Tn. Acero producido
Energía total: 653.78 kWh/Tn. Chatarra
719.28 kWh/Tn. Acero producido

4.2. Tiempo de Operación

También se midieron los siguientes promedios de tiempo de operación de fusión y afino:

Tiempo de fusión (TF - DTF) = $203.63 - 36.83 = 166.8$ min
Tiempo de afino (TA - DTA) = $54.03 - 4.00 = 50.03$ min
Tiempo neto de operación: 216.83 min

4.3. Consumo de Carburante

Tomando como base los meses de Diciembre del año 2004 y Enero del año 2005, las tasas (índices) de consumo promedio respecto a la chatarra cargada y el acero en palanquilla producido fueron:

Tasa (Índice) de consumo de antracita: 3.05 kg/Tn Chatarra
3.4 kg/Tn Acero producido

4.4. Consumo de Cal

Las tasas (índices) de consumo promedio de cal respecto a la chatarra cargada y el acero en palanquilla producido, se efectuaron tomando como base los meses de Diciembre del año 2004 y Enero del año 2005 y se obtuvieron los siguientes datos:

Tasa (Índice) de consumo de cal: 53.8 kg/Tn Chatarra
60.12 kg/Tn Acero producido

4.5. Consumo de Electrodo y Niples

Las tasas (índices) de consumo promedio de electrodos respecto a la chatarra cargada y el acero en palanquilla producido, se también se efectuaron tomando como base los meses de Diciembre del año 2004 y Enero del año 2005, con los siguientes resultados:

Tasa (Índice) de consumo de electrodos y niples: 4.37 kg/Tn Chatarra
4.89 kg/Tn Acero producido

4.6. Consumo de Refractarios

Las tasas (índices) de consumo promedio de masas refractarias respecto a la chatarra cargada y el acero en palanquilla producido, se efectuaron tomando como base los meses de Diciembre del año 2004 y Enero del año 2005:

Tasa (Índice) de consumo de masas: 2.93 kg/Tn Chatarra
3.28 kg/Tn Acero producido

4.7. Caracterización de Escorias y Antracita

Durante el seguimiento al proceso tradicional, se tomaron muestras de escoria de fusión - refinación que fueron enviadas al laboratorio para su respectivo análisis químico. El objetivo de este análisis fue llevar a cabo posteriormente una comparación con muestras de escoria espumosa, para determinar si la implementación de este proceso tiene efectos positivos sobre el rendimiento metálico de la operación expresado por los menores niveles de FeO en la escoria.

La Tabla 4 muestra los resultados del análisis de muestras de escorias del proceso tradicional terminada la fusión.

Tabla 4. Composición de escorias en etapa de fusión/oxidación obtenidas por el proceso tradicional (sin escoria espumosa)

Muestra (colada Nº)	% SiO ₂	% CaO	% Al ₂ O ₃	% Mg O	% Cr ₂ O ₃	% Mn O	% P ₂ O ₅	% FeO	% S	% Fe total	Bas
1413	8.03	24.76	2.13	6.63	0.49	5.48	0.50	49.28	0.13	38.2	3.09
1417	10.17	53.32	2.84	7.06	0.40	4.52	1.80	18.89	0.20	14.67	4.64
1509	22.47	41.19	4.96	2.08	0.47	5.64	1.15	20.87	0.17	16.18	1.58
1522	18.99	50.15	4.73	2.08	0.58	4.68	1.07	16.56	0.16	12.84	2.20
1545	11.77	47.50	2.83	8.92	0.69	4.35	0.57	22.26	0.14	16.50	3.87
PROMEDI O	14.29	43.38	3.50	5.35	0.53	4.93	1.02	25.57	0.16	19.68	3.08

Datos suministrados por el laboratorio de análisis químico de Acerías Paz del Río S.A.

La antracita utilizada como carburante tiene las siguientes características:

Humedad (a,r)	1.83
Materias volátiles	6.42
Cenizas	10.35
Carbono fijo	83.23

Granulometría 1 – 5 mm

Las características anteriores fueron determinadas en el laboratorio químico de Acerías Paz del Río S.A, mediante un análisis de una muestra representativa de antracita tomada en las bodegas de la compañía.

5. PRINCIPIOS SOBRE LA ESCORIA ESPUMOSA

La importancia de fabricación de acero utilizando la escoria espumosa radica en la reducción del tiempo de operación, trayendo consigo una disminución en el consumo de energía y refractarios.

5.1. Formación de la Escoria Espumosa

5.1.1. Mecanismo de formación de la escoria espumosa. La generación de la escoria espumosa se lleva a cabo en un proceso metalúrgico básico si el contenido del carbono en el acero es alto y si la adición de cal para la formación de la escoria es elevada. La escoria espumosa se genera en el Horno Eléctrico, generalmente durante la inyección de oxígeno.

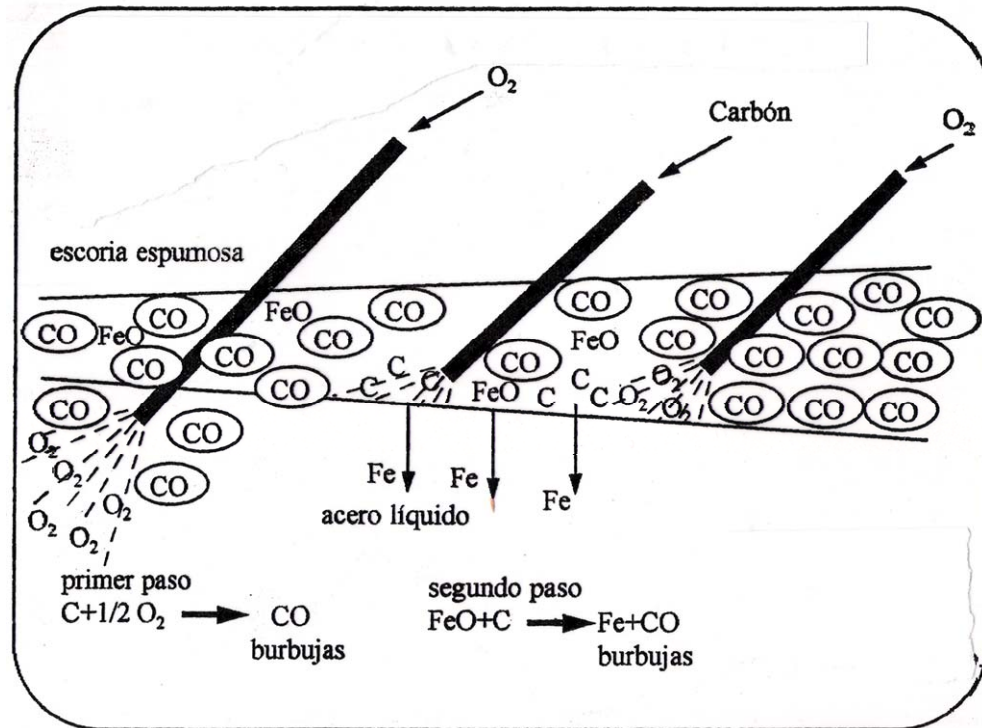
La reacción fundamental que se requiere para producir las condiciones de espumación de la escoria, es la generación del monóxido de Carbono:



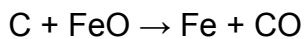
Esta reacción puede ocurrir espontáneamente, por reacción entre el carbono del acero y los óxidos que forman la escoria, o puede ser inducido por adición de Carbono y Oxígeno. Las condiciones de espumación dependen de la composición química de la escoria, de sus propiedades físicas y de su temperatura.

5.1.2. Proceso desarrollado con escoria espumosa. Es un proceso en el cual una corriente a presión de oxígeno se inyecta por medio de una lanza sobre la superficie del baño metálico.

Grafica 1.Principios de la escoria espumosa



En el contacto inicial con el acero, se presenta una decarburación parcial del metal en la zona de reacción, resultando una saturación de la escoria en FeO en forma de pequeñas gotas que posteriormente entran en contacto con el Carbono y desprenden CO, que a su vez reacciona con la escoria produciendo la espumación como se muestra en la figura 1. Aquí se asume que la principal reacción que se presenta cuando el carbón es inyectado dentro de la escoria es:

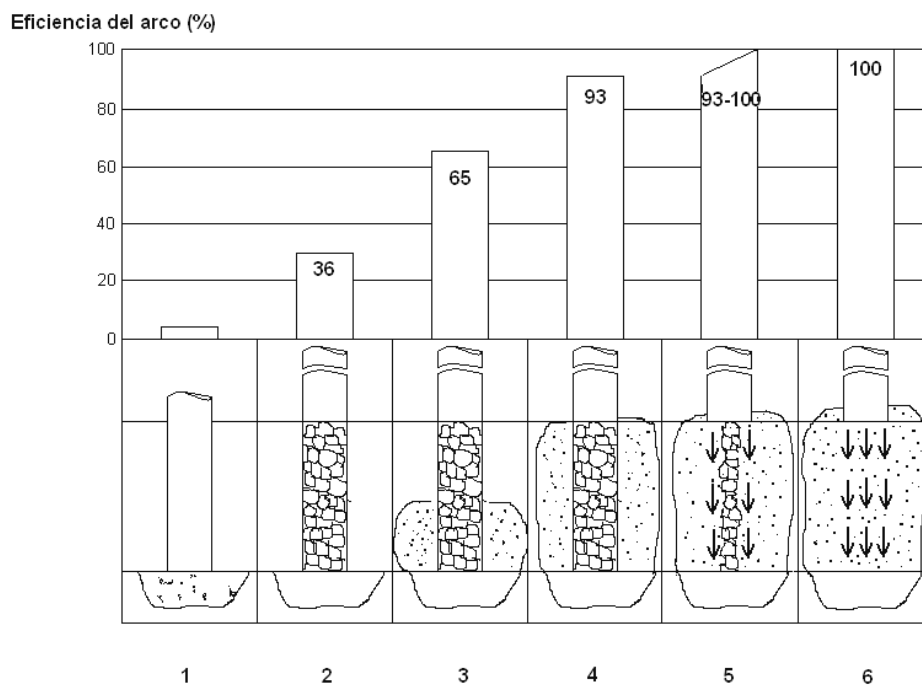


Para que se produzca la espumación, es indispensable que la capa de escoria tenga un espesor alto, fluidez buena y contenido de Oxido Ferroso.

5.2. Interacción Arco – Escoria

Durante la fabricación del acero en un horno eléctrico, las condiciones para transmitir la energía cambian de acuerdo con el grado de cubrimiento del arco eléctrico, dándose los siguientes casos que se ilustran en la Figura 2.

Grafica 2: Grafica de la eficiencia de la transferencia energética mediante arco directo



Tomado de: IHOBE, S.A. Sociedad pública de gestión ambiental. Libro Blanco para la minimización de residuos y emisiones, escorias de acerías. Comunidad autónoma del país Vasco, 1997.

1: corto circuito, 2: arco expuesto, 3: ½ arco cubierto, 4: arco cubierto

5: calentamiento parcial por resistencia, 6: calentamiento total por resistencia

5.2.1. Arco descubierto. Se presenta generalmente al final del periodo de fusión. Bajo estas condiciones se presenta un desgaste excesivo del refractario del Horno en las zonas cercanas a los electrodos; el arco está descubierto permanentemente, por lo cual la transferencia de calor del arco en el baño es muy reducido aproximadamente del 20 al 36%, perdiéndose el resto de la energía calórica en dirección radial.

5.2.2. Arco semi-sumergido. Cuando el espesor de la escoria es mayor, las condiciones del arco varían un poco. El área de desgaste del revestimiento disminuye; en esta situación el arco está casi sumergido en la escoria, por lo cual la energía se concentra en una sola dirección aprovechándose más la transferencia de calor.

5.2.3. Arco sumergido. Este caso se observa cuando la escoria, cubre totalmente el arco. La punta del electrodo está siempre cubierta por pequeñas “bolas de fuego”. Un fenómeno observado es la marcada concavidad de la punta del electrodo. Con este tipo de escoria el aprovechamiento de la energía se incrementa hasta en un 93%.

5.3. Estructura y Propiedades de las Escorias

5.3.1. Generalidades. Generalmente los metales se extraen a partir de menas, las cuales siempre están asociadas a impurezas llamadas gangas. Durante la extracción del metal se elimina la ganga, mediante la adición de fundentes adecuados, en forma de escoria la cual por ser insoluble en el metal y más liviana que él, forma una capa separada. Los fundentes más ampliamente usados son: CaO, MgO y CaF₂.

Una escoria líquida es por tanto, un fundido homogéneo de uno o más compuestos químicos formados de varios óxidos, el cual se separa de la fase metálica o baño de acero a causa de su insolubilidad y menor densidad.

La composición y propiedades de una escoria dada para la producción en Horno Eléctrico, determinan la calidad del acero obtenido, la velocidad de producción, el desarrollo y la eficiencia del proceso, la temperatura necesaria, la cantidad y composición del fundente a utilizar³.

5.3.2. Estructura de las escorias

➤ Conceptos generales. La estructura cristalina de la casi totalidad de las escorias, luego de su solidificación, se ha establecido por estudios petrográficos, análisis de rayos X y por diagramas de fase.

En el estado sólido, la estructura de las escorias formadas por óxidos básicos tales como: CaO, MgO, MnO y FeO, se rigen por un ordenamiento cerrado de oxígeno, donde los cationes se encuentran acomodados en los intersticios o espacios. La mayoría de estos óxidos forman estructuras similares a las de la sal (NaCl), en donde cada catión se encuentra en coordinación con seis aniones de oxígeno y viceversa. Esta coordinación es conocida como octaédrica, presentada por algunos óxidos básicos. Por el contrario la coordinación tetraédrica sólo la presentan los cationes de los óxidos ácidos, tales como el SiO₂, Al₂O₃ y el P₂O₅⁴.

³ ILAFA – SOMISA. Escorias Siderúrgicas. Argentina, 1985, pag. 2-3.

⁴SIMS, Clarence. Electric Furnace steelmaking: Theory and Fundamentals. AIME, 1967, pag. 187

Una escoria líquida del Horno Eléctrico está compuesta casi en su totalidad por estructuras silicatadas, las cuales se generan a partir de redes tetraédricas elementales de SiO₂ dispersas en estado líquido, entonces cuando un óxido básico es agregado, a este líquido, cada ión de oxígeno entra a formar parte de la red llegando a ocurrir la ruptura de las esquinas de los tetraedros, en tanto que los demás cationes se acomodan entre las capas o celdas de la estructura.

Con la adición de más óxidos básicos, la estructura tridimensional presenta rupturas, hasta que la sílice se presenta como pequeños grupos de (SiO₄)⁻. Con esta base, se forman una serie de iones de silicatos complejos, los cuales se agrupan en la tabla 5 de la siguiente forma 5 :

Tabla 5. Agrupamiento de silicatos complejos

RELACION O/Si	ION	FORMA MOLECULAR
2:1	(SiO ₄)	SiO ₂
5:2	(Si ₂ O ₇)	M.2SiO ₂
3:1	(Si ₃ O ₉)	M.SiO ₂
7:2	(Si ₄ O ₁₂)	3M.2SiO ₂
4:1	(Si ₆ O ₈)	2M.SiO ₂

Tomado de: BODSWORTH, C. y BELL, B. Physical chemistry of Iron and steel manufacture. Longman group,

Donde M es el óxido básico adicionado.

5 BODSWORTH, C. y BELL, B. Physical chemistry of Iron and steel manufacture. Longman group, 1972, pag. 569.

- Observaciones acerca de la constitución de la escoria. La escoria es un componente esencial en los procesos metalúrgicos de oxidación y/o reducción.

Las reacciones del Carbono, Silicio, Manganeso y Cromo dependen principalmente de la escoria. En un proceso básico de fabricación de acero la totalidad del Fósforo y la mayor parte del Azufre pueden eliminarse a través de la escoria. Su función es retener los elementos y compuestos no deseados en el baño metálico, para lo cual la actividad de aquellos en la escoria debe ser la mínima compatible con las demás variables del proceso, y por lo menos inferior a las actividades de los mismos en el baño metálico.⁶

5.3.3. Propiedades de las escorias. A continuación se presenta un breve resumen acerca de ciertas propiedades físicas y químicas de las escorias. Entre ellas están la viscosidad, la presión de vapor, la conductividad eléctrica, la tensión superficial, el índice de basicidad. Datos acerca de otras propiedades de las escorias, tales como calor específico, índice de refracción, densidad y susceptibilidad magnética se pueden obtener a partir de muestras de escorias en estado sólido.

- Propiedades físicas.

Viscosidad. La viscosidad se define como la propiedad de resistencia de un líquido a su libre flujo y se expresa por la relación:

$$F/A = \eta (du/dy)$$

Donde:

F/A = fuerza requerida por unidad de área para mantener dentro del fluido un gradiente de velocidad normal du/dy ,

⁶ ILAFA – SOMISA, op. Cit, pag.15.

n = coeficiente de viscosidad

La viscosidad se considera como una función de las tasas de reacción, difusión, temperatura, composición de las mismas y esta gobernada por grandes grupos de silicatos.

Presión de vapor. La presión de vapor del líquido es la presión ejercida por este, cuando se encuentra en equilibrio con el líquido. La presión de vapor de una escoria puede ser estudiada a partir de la presión de vapor de algunos de sus componentes, y de este modo obtener información acerca de su estructura.

Conductividad eléctrica. La conducción de la electricidad en las escorias se debe a que estas son una mezcla desordenada de aniones y cationes, partículas eléctricamente cargadas que permiten el paso de las corrientes eléctricas.

Tensión superficial. La tensión superficial es el trabajo que deben realizar las partículas de la superficie para evitar que las fuerzas internas del líquido (acero) lleven las partículas al exterior. La tensión superficial de una escoria esta íntimamente relacionada con el tipo de enlace que presente el oxígeno, la basicidad y la estructura de la escoria.

➤ Propiedades químicas. Los términos más empleados para describir el comportamiento químico de las escorias en el horno son la basicidad y el poder oxidante. El significado general de estos términos es el mismo, tanto para la operación metalúrgica en sí como para las experiencias realizadas en los laboratorios.

Los óxidos formadores de escoria más comunes, se agrupan de acuerdo con su basicidad relativa, en un listado que se basa en las fuerzas de enlace metal-ión-oxígeno, pudiéndose observar el aumento de la basicidad y la acidez, así:

Aumento de la basicidad →

B₂O₃, SiO₂, P₂O₅, Al₂O₃, TiO₂, FeO, MgO, MnO, CaO.

← Aumento de la acidez

En términos generales el valor de la basicidad de las escorias puede ser expresado mediante la siguiente relación:

$$B = \frac{\%CaO}{\%SiO_2}$$

Otra forma general de expresar la basicidad es:

$$B = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}$$

6. EQUIPO A UTILIZAR PARA LA FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA

6.1. Descripción y Partes de la Máquina Inyectora .

La máquina consiste en una máquina inyectora semiautomatizada de materiales pulverulentos para la inyección de antracita en corriente de aire. Básicamente, la máquina consta de las siguientes partes:

Fotografía 2: Máquina inyectora de antracita semiatomatizada



Fotografía tomada por los autores del libro.

6.1.1. Sistema de cargue del silo de almacenamiento. El sistema de cargue del silo de la máquina involucra a los siguientes elementos:

- 1°. La cesta de cargue
- 2°. El silo de almacenamiento
- 3°. La puente grúa del horno
- 4°. El operador de la máquina

1°. LA CESTA DE CARGUE. La cesta de cargue fue diseñada específicamente para cargar la máquina mediante el puente grúa del horno. Dicha cesta tiene una capacidad de 500 kilogramos y es cargada con antracita por el operario de la máquina y transportada mediante el puente grúa hasta el silo de almacenamiento donde es vaciada; quedando lista para ser regresada nuevamente al piso donde se encuentra la antracita para repetir la operación anterior hasta llenar el silo completamente.

2°. EL SILO DE ALMACENAMIENTO. Este silo de almacenamiento ubicado en la parte alta justo encima de la tolva o tanque, tiene como función almacenar la materia prima (antracita) que será utilizada durante la proyección. Tiene una capacidad de almacenamiento de siete toneladas de antracita.

3°. LA PUENTE GRUA. Hace referencia este tercer elemento a la grúa del horno eléctrico encargada del cargue y transporte de las materias primas del horno y entre ellas la de transportar la cesta de carga con antracita desde el piso hasta el silo de almacenamiento de la máquina, las veces que sea necesario hasta llenar el silo.

El operador de la grúa coordinara la operación de llenado del silo con el jefe de turno del horno.

4°. EL OPERARIO DE LA MAQUINA. El operario de la máquina hace referencia al operario de turno encargado de llenar la cesta de carga con antracita y de coordinar con el operador de la grúa el llenado del silo de almacenamiento.

6.1.2. Sistema de control de la máquina. El sistema de control de la máquina consta de un autómata marca “Telemecanique” ubicado en la parte lateral de la máquina junto con los dispositivos neumáticos, eléctricos y electrónicos necesarios distribuidos en la parte interior de la máquina. Consta también de una báscula electrónica con indicador digital para el registro del peso de la antracita como también de cinco válvulas automáticas controladas por el autómata (PLC control lógico programable).

Para el comando de la máquina se dispone de una botonera con tres pulsadores. Cada pulsador ejerce una doble función: arranque/parada.

De esta manera dispone de tres pulsadores para: comandar la inyección de oxígeno, la inyección de antracita y el comando para el llenado del tanque de la máquina.

La máquina consta de dos lanzas de inyección totalmente independientes una de la otra. Una primera lanza para la inyección de oxígeno y la segunda lanza para la inyección de antracita.

Cada lanza va acoplada a la máquina mediante mangueras flexibles de alta presión y conectadas mediante acoples rápidos, para facilitar su cambio. La manguera para la antracita es resistente a la fricción.

Se obtuvieron buenos resultados en la inyección de antracita utilizando mangueras de 1 pulgada de diámetro y utilizando lanzas del mismo diámetro.

El operador de la máquina manipulara ambas lanzas simultáneamente y en forma paralela, esto para efectuar correctamente el proceso de formación de escoria espumosa; sin embargo se puede inyectar oxígeno y antracita independientemente cuando las circunstancias lo ameriten bien sea para oxidar o carburar el baño de acero.

6.2. Inspección y Ajustes a la Máquina Inyectora

Para la puesta a punto de la máquina inyectora, se le hizo una rigurosa inspección durante los meses de diciembre del 2004 y parte del mes de enero del 2005.

El primer aspecto que se tuvo en cuenta fue su fuente de alimentación eléctrica y el flujo de corriente (continuidad) en ella; posteriormente, se hicieron algunos ensayos preliminares con la máquina, que permitieron observar que la máquina tenía algunos inconvenientes técnicos los cuales fueron resueltos, tales como:

Tolva de almacenamiento. Con el fin de lograr un buen funcionamiento de la máquina, se colocó una malla metálica en la parte superior de la tolva, con el fin de que sirviera como tamiz para que las partículas de tamaño mayor a 1cm que descargue el silo de almacenamiento se quede en la rejilla y no ocasionará taponamiento ya sea de la máquina o de la manguera.

Válvula de despresurización. La válvula que tenía era de resorte la cual permanecía casi limpia, pero luego de algunos ensayos se atoraba debido a que el aire que salía de la despresurización estaba contaminado con partículas muy finas de material depositado en la tolva de almacenamiento. Se trató de solucionar este problema haciendo una constante lubricación, pero debido a que el problema continuó, se tomó la decisión de cambiar el tipo de válvula por una válvula de bola.

Manguera de proyección. La manguera de $\frac{3}{4}$ " de diámetro presentó inconvenientes tales como:

Baja resistencia a la fricción que producía el aire transportando la antracita, debido a esto la manguera se desgastaba en su interior y reventaba con facilidad.

Manguera para bajas presiones y por esto causaba taponamientos.

Por estas razones se procedió a cambiar la manguera por una de mayor presión y de 1" de diámetro.

Capacidad de la máquina:

La capacidad de la tolva de 120 kg pasó a 100 kg, ya que los 120 kg originados no dejaban presurizar totalmente la tolva.

El caudal de inyección de antracita pasó de 25 kg/min a 35 kg/min, como consecuencia del cambio de manguera.

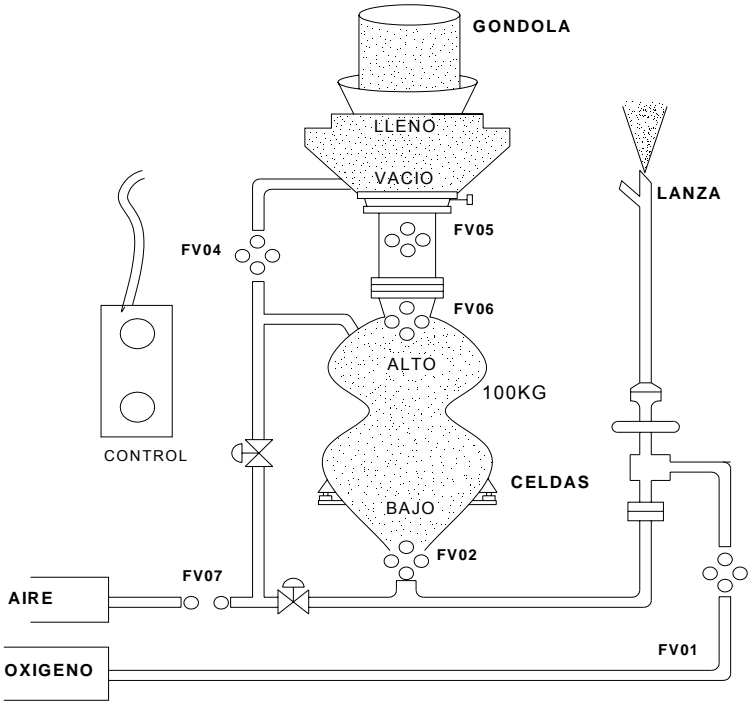
6.3. Descripción Técnica

CAPACIDAD DEL SILO DE ALMACENAMIENTO	7 TON
CAPACIDAD DE LA TOLVA	100KG
PRESION DEL AIRE DE ALIMENTACION	60 – 70 PSI
CAUDAL NECESARIO DEL AIRE COMPRIMIDO	5M3/MIN

CAUDAL DE PROYECCION CON LANZA $\frac{3}{4}$ PULG.	25KG/MIN
CAUDAL DE PROYECCION CON LANZA 1 PULG.	35KG/MIN
PESO DEL EQUIPO SIN CARGA	800KG
MATERIAL A PROYECTAR	ANTRACITA
GRANULOMETRIA DEL MATERIAL A PROYECTAR	1-5 mm

6.4. Manual de Operación de la Máquina Inyectora

Grafica 3. Diagrama de operación de la máquina inyectora



Gráfica elaborada por los autores

6.4.1. Funcionamiento de la máquina. El principio de funcionamiento de la máquina es de carácter neumático: Básicamente, la máquina tiene un tanque o tolva donde es almacenada la antracita, que es transportada mediante una corriente de aire comprimido a una presión de 60 psi desde la tolva o tanque donde se encuentra el material que se va a proyectar hacia la lanza de proyección manipulada por el operador y orientada hacia el baño de acero donde se ubican los electrodos dentro del horno eléctrico.

Simultáneamente se efectúa la inyección de oxígeno mediante otra lanza paralela a la de antracita pero introducida dentro del baño de acero ya mencionado para efectuar así el proceso de formación de la escoria espumosa.

IMPORTANTE: EL TABLERO DE CONTROL PARA LA OPERACIÓN DE LA MAQUINA DISPONE DE UNA BOTONERA CON TRES PULSADORES QUE EJERCEN CADA UNO LA DOBLE FUNCION DE ARRANQUE Y PARADA DE LA INYECCION DE ANTRACITA Y DE OXIGENO, Y DEL CIRCUITO DE LLENADO DE LA MAQUINA.

➤ Llenado de la máquina. El llenado de la máquina se efectúa automáticamente, esto es mediante la acción del PLC. Pulsando el botón de cargue de la máquina, se abre inmediatamente la válvula de purga FV04 del tanque, 20 segundos más tarde y una vez despresurizado el equipo se abre la válvula de llenado FV06 y posteriormente a los 15 segundos se abre la válvula de descarga del material FV05, inmediatamente el material (antracita) empieza a bajar y a llenar el tanque de la máquina, ésta operación es mostrada por el incremento en el registro del indicador digital de la báscula electrónica, una vez llena el tanque, el PLC acciona automáticamente el cerrado de las válvulas de llenado FV06 y de descarga FV05 de material con el intervalo de 15 segundos entre ellas, posteriormente se cierra la válvula de purga FV04 quedando de ésta manera lista para la inyección de antracita.

➤ Inyección de antracita. Para iniciar la operación se da primero paso a la corriente de oxígeno y posteriormente se abre la válvula de inyección de material.

Una vez efectuado el llenado de la máquina, y estando el horno eléctrico en operación se hace la inyección de oxígeno orientando la lanza de 3/4 de pulgada convenientemente hacia el baño de acero líquido pulsando el botón de inyección e inmediatamente se abrirá la válvula de inyección de O₂ FV01 posteriormente se inyecta la antracita pulsando sobre el botón de inyección de antracita.

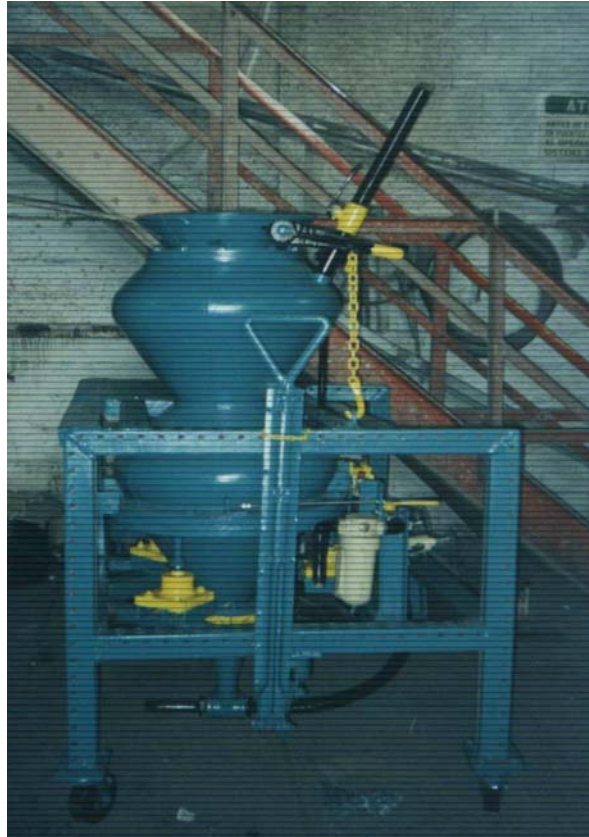
Inmediatamente se abre la válvula de barrido FV07 y por la punta de la lanza de inyección de material saldrá aire comprimido a una presión cercana a la de la red de alimentación, éste barrido expulsará cualquier residuo de material contenido dentro de la lanza o tubo de inyección al mismo tiempo que realiza una limpieza de las mangueras por donde pasa el material, a los 10 segundos se abre la válvula de inyección de material FV02 y el material (antracita) empieza a fluir desde el tanque de almacenamiento presurizado hacia la lanza donde es proyectado (disparado) hacia la superficie del baño de acero.

Durante la inyección de antracita y oxígeno, cuando ya se ha obtenido una buena espumación de la escoria, se suprime temporalmente el paso de antracita pulsando el botón de inyección de antracita nuevamente el cual hará que se cierre la válvula de inyección de antracita FV02; sin embargo la válvula de barrido FV07 continuará abierta por 20 segundos más para asegurar una limpieza del material que pudiera quedar en la tubería, en la manguera y en la lanza de inyección del material.

A medida que disminuye el efecto espumante, se reinicia la inyección de antracita y se suspende cuando se consiga el efecto de espumación nuevamente, esto se lleva a cabo el número de veces que se requiera.

6.5. SÍNTESIS DE OPERACIÓN DE LA MÁQUINA

Fotografía 3: Tolva de almacenamiento



Fotografía tomada por los autores de la máquina inyectora

Los principales aspectos a tener en cuenta para el correcto funcionamiento del equipo:

Cargar el silo de almacenamiento con la cesta construida para tal fin utilizando la puente grúa del horno eléctrico, esta operación se hace previamente y hace parte

del alistamiento para puesta en servicio de la máquina, así mismo la conexión correcta de las mangueras de inyección tanto de O₂ como de antracita, y ubicarlas correctamente lo más lineal posible y sin ningún estrangulamiento y en óptimas condiciones de operación.

Alimentar eléctricamente la máquina accionando el interruptor principal dispuesto para tal fin. Con ello estaremos alimentando eléctricamente a la autómatas programable y a todos los dispositivos asociados.

Verificar que la presión de aire de alimentación para el equipo sea igual o mayor a 60 psi. Bajo estas condiciones proceder a abrir la válvula general de entrada de aire comprimido. Esto presurizará la tolva, al nivel programado en el regulador.

Verificar que la presión de oxígeno este graduada para una presión de inyección por debajo de 9 bares. Efectuando lo anterior (numerales 1,2 y 3) la máquina se encuentra lista para ser operada.

Pulsar el botón de llenado de la máquina. Esta operación se efectuará automáticamente.

Una vez cargada la máquina el operador ubica la lanza de oxígeno y la lanza de proyección de material en la dirección correcta sobre el baño de acero líquido por la compuerta del horno eléctrico, pulsa el botón de inyección de antracita y posteriormente el botón de inyección de oxígeno, de esta manera se empieza el proceso de formación de la escoria espumosa, y el operario controlará el proceso mediante la lectura del display exterior que le indica la cantidad de material proyectado y mediante la observación visual de dicho proceso.

Para detener la proyección, se pulsa nuevamente el botón de inyección de oxígeno y posteriormente el botón de inyección de antracita. El momento preciso

para estas dos operaciones depende del comportamiento del baño de acero durante el proceso.

6.6. Mantenimiento

Un buen mantenimiento para la máquina consiste en mantenerlo en óptimas condiciones de orden y aseo.

Es relevante mantener las mangueras libres de estrangulamientos y de fisuras.

La limpieza diaria asegura una larga duración y funcionamiento óptimo de la máquina, así como también evita averías que son causadas por el taponamiento con objetos extraños que lleguen a la tolva de almacenamiento del carburante.

La campana que cierra la tolva de almacenamiento debe permanecer arriba durante la proyección y cuando no se esté utilizando la máquina, para evitar la caída de objetos extraños que cause taponamientos.

Cada vez que se termine una colada, la máquina debe ser revisada en las partes que se haya notado alguna falla: tales como en válvulas, báscula, fines de curso, cableado, automatismos etc.

6.7. Mantenimiento diario

Limpiar la máquina al finalizar cada turno.

Sopletear la máquina externamente para evitar acumulación de polvo en los registros y válvulas.

Verificar que no existan taponamientos en el acople de salida, en la manguera o en la llave de proyección de antracita.

Evitar la caída de objetos extraños de tamaño mayor a 1/2" dentro de la tolva de almacenamiento, ya que causa taponamientos.

Una vez desocupada la máquina y cuando esta no se encuentre funcionando, por la parte de arriba se extraen papeles, pitas y pedazos de plástico que caen al desocupar los bultos de antracita.

Mantenimiento semanal

Controlar el nivel de aceite del motor neumático utilizando 1/4 de galón de aceite hidráulico y llenarlo hasta nivel óptimo si es necesario.

6.8. Posibles Fallas De La Máquina Inyectora

6.8.1. El motor no arranca.

Causas

Baja presión de alimentación

Nivel de aceite bajo

Escape de aire por alguno de los acoples de las mangueras

Registro de despresurización y campana de la tolva de alimentación abiertos

Soluciones

Esperar a que la presión aumente

Lubricar el motor hasta nivel óptimo

Ajustar las abrazaderas de los acoples

Cerrar los registros y la campana

6.8.2. El rotor no gira.

Causas

Acople defectuoso entre el eje que va del motor al Rotor

Soluciones

Revisar el acople

Ajustarlo con llave expansiva

Verificar que esté completamente empatado con el Rotor

6.8.3. Taponamientos.

Causas

Trozos demasiado grandes que caen dentro de la tolva y obstruyen la salida de la antracita en el acople de la manguera

Acumulación de antracita en la llave que se encuentra en el extremo de la manguera

Tubos con pestañas que obstaculizan la proyección o que se tapan con escoria

Soluciones

Soltar las tuercas que aseguran el acople y permitir la salida del material cerrando el registro de llegada del aire a la tolva inferior.

Soltar el tubo o lanza consumible y permitir que salga cierta cantidad de antracita, si es necesario cambiar el tubo.

Los tubos con pestaña deben ser cambiados y si están taponados con escoria se deben golpear para eliminarla, de lo contrario se cambia el tubo.

7. DISEÑO EXPERIMENTAL

Las observaciones de un experimento factorial pueden describirse con un modelo. A la vez este modelo puede escribirse de varias formas, por ejemplo: modelo de las medias, modelo de regresión y modelo de los efectos.

El modelo de las medias de celdas para un experimento de tres factores y r réplicas de cada una de las abc combinaciones de tratamientos en el diseño es:

$$Y_{ijk} = \mu_{ijk} + \varepsilon_{ijkrl} \quad (1)$$

$$i = 1,2 \quad j = 1,2 \quad k = 1,2 \quad rl = 5 \text{ coladas} = 1, 2, 3, 4, 5 \text{ réplicas}$$

donde ε_{ijkrl} es un componente del error aleatorio que incorpora todas las demás fuentes del experimento, incluyendo las mediciones, la variabilidad que surge de factores no controlados, las diferencias entre las unidades experimentales (materiales de prueba, etc.) y μ_{ijk} es la media de las celdas expresada como una función del factorial de los efectos principales y las interacciones.

El primer componente del modelo de las medias μ_{ijk} es llamado modelo de regresión y se expresa como:

$$\mu_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \Gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\Gamma)_{ik} + (\beta\Gamma)_{jk} + (\alpha\beta\Gamma)_{ijk} \quad (2)$$

donde α_i , β_j y Γ_k son los efectos principales de X_1 , X_2 y X_3 respectivamente. Los efectos de la interacción respectivos de dos factores son $(\alpha\beta)_{ij}$, $(\alpha\Gamma)_{ik}$ y

$(\beta\Gamma)_{jk}$, y el efecto de la interacción de los tres factores es $(\alpha\beta\Gamma)_{ijk}$. y μ es un parámetro común a todos los tratamientos al que se le llama la media global.

El uso de la partición para probar formalmente que no hay diferencias en las medias de los tratamientos requiere que se satisfagan ciertos supuestos.

Específicamente, el modelo de los supuestos para este caso es:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \Gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\Gamma)_{ik} + (\beta\Gamma)_{jk} + (\alpha\beta\Gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad (3)$$

La ecuación anterior se le llama por lo general el modelo de los efectos.

Tanto el modelo de las medias como el de los efectos son modelos estadísticos lineales; es decir, la variable de respuesta Y_{ijk} es una función lineal de los parámetros del modelo. Aun cuando ambas formas del modelo son útiles, el modelo de los efectos se encuentra con mayor frecuencia en la literatura del diseño experimental.

A la ecuación (1) o (3), se le llama también modelo del análisis de varianza de tres factores. Los objetivos serán probar hipótesis, suponiendo que los errores del modelo son variables aleatorias que siguen una distribución normal e independiente con media cero y varianza σ^2 cuya abreviatura es $(0, \sigma^2)$. Si estos supuestos se satisfacen, el procedimiento del análisis de varianza es una prueba exacta de la hipótesis de que no hay diferencias en las medias de los tratamientos.

Sin embargo, es común que en la práctica estos supuestos no se satisfagan exactamente. Las violaciones de los supuestos básicos y la adecuación del modelo pueden investigarse con facilidad mediante el examen de los residuales.

El examen de los residuales deberá ser una parte automática de cualquier análisis de varianza. Si el modelo es adecuado, al hacer un análisis gráfico de los residuales deberán estar sin estructura, por ejemplo no deben tender a formar una especie de megáfono.

El procedimiento general es muy simple y puede realizarse con la mayoría de los paquetes de software de estadística.

Cuando existe desviación de los supuestos del análisis de varianza, se introduce una transformación de la variable respuesta como un método apropiado para estabilizar la varianza de la respuesta. En general, las transformaciones se usan para tres propósitos: estabilizar la varianza de la respuesta, hacer que la distribución de la variable de respuesta este más cerca de la distribución normal y mejorar el ajuste del modelo a los datos.

En un modelo lineal, la variable respuesta puede tener cualquier distribución que sea un miembro de la familia exponencial. Esta familia incluye las distribuciones normal, de Poisson, binomial, exponencial y gamma.⁷

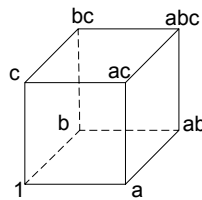
En este estudio hay dos o más variables relacionadas, y el interés se centra en modelar y explorar esta relación. La relación que existe entre estas variables se caracteriza por un modelo matemático llamado modelo de regresión. Dicho modelo se ajusta a un conjunto de datos muestrales y se utilizan con frecuencia para analizar datos de experimentos.

Para desarrollar este diseño experimental se utilizó el modelo estadístico factorial 2³, el subíndice 2 indica los niveles del factor y la potencia 3 los factores

⁷ MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y Análisis de Experimentos. Limusa Wiley, 2004, pag. 80-81, 594-595.

influyentes en el proceso, en este caso la representación geométrica de las ocho combinaciones de tratamientos puede hacerse en un cubo (Fig. 4).

Grafica 4: Gráfica vista geométrica



Tomada de: MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y Análisis de Experimentos. Limusa Wiley, 2004

Existen tres notaciones diferentes para los tratamientos del diseño 2^3 que son de uso general. La primera es la notación “+” y “-“, llamada con frecuencia notación geométrica. La segunda es el uso de las etiquetas en letras minúsculas para identificar las combinaciones de los tratamientos. La tercera notación utiliza 1 y 0 para denotar los valores alto y bajo, respectivamente, de los factores, en lugar de “+” y “-“, como se ilustra en la tabla 6.

Tabla 6. Notaciones para los tratamientos del diseño 2^3

Tratamiento	X1	X2	X3	Etiquetas	X1	X2	X3
1	-	-	-	(1)	0	0	0
2	+	-	-	a	1	0	0
3	-	+	-	b	0	1	0
4	+	+	-	ab	1	1	0
5	-	-	+	c	0	0	1
6	+	-	+	ac	1	0	1
7	-	+	+	bc	0	1	1
8	+	+	+	abc	1	1	1

Tomada de: MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y Análisis de Experimentos. Limusa Wiley, 2004

En este estudio hay dos o más variables relacionadas, y el interés se centra en modelar y explorar esta relación. En general la variable respuesta depende de variables independientes, la relación que existe entre estas variables se caracteriza por un modelo matemático llamado modelo de regresión. Dicho modelo se ajusta a un conjunto de datos muestrales y se utilizan con frecuencia para analizar datos de experimentos.

7.1. Desarrollo del Diseño Experimental

Después de hacer la identificación y delimitación del problema, se procede a elegir factores, niveles y rangos.

En este trabajo, se partió de identificar tres factores que influyen directamente en la formación de escoria espumosa, que son:

X1 = Antracita proyectada

X2 = Presión de oxígeno

X3 = Carga de cal

Los datos evaluados a partir de estas variables de entrada, permiten determinar los rangos de las variables respuestas:

Y1 = Medida directa del consumo de energía kWh/ton Chatarra

Y2 = Medida directa del tiempo en minutos.

Para determinar los valores máximos y mínimos de las variables se realizaron pruebas de formación de escoria espumosa, regulando presión de oxígeno (bares), carga de cal (kg) y antracita proyectada (kg), de tal forma que permitieran observar el grado de espumación de la escoria, y así poder ajustar estas variables. Los valores máximos y mínimos determinados para estas variables son entonces los siguientes:

Antracita proyectada 20 – 30 kg

Flujo de Oxígeno 5 – 8 bares

Carga de cal 1800 – 2200 kg

Durante la formulación de este proyecto, se evidenciaron las ventajas de la implementación de la escoria espumosa en el horno eléctrico. Estas ventajas se reflejan en un ahorro significativo del consumo de energía y tiempo de operación.

El diseño experimental se baso en un modelo estadístico factorial 2K, donde el subíndice 2 indica los niveles del factor y la potencia (k=3) representa el número de variables que influyen en el proceso.

Las mezclas empleadas en las pruebas de formación de escoria espumosa fueron elaboradas tomando los valores máximos y mínimos de cada variable que se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Valores máximos y mínimos de las variables influyentes en el proceso de formación de escoria espumosa

	X1 (kg)	X2 (m3/min)	X3 (kg)
1	20	5	1800
a	30	5	1800
b	20	8	1800
ab	30	8	1800
c	20	5	2200
ac	30	5	2200
bc	20	8	2200
abc	30	8	2200

Tomada de: MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y Análisis de Experimentos. Limusa Wiley, 2004

Puesto que se va a trabajar bajo un modelo estadístico es necesario asignarle una letra a cada una de estas variables:

α_i = efecto antracita $i = 1,2$

β_j = efecto oxígeno $j = 1,2$

Γ_k = efecto cal $k = 1,2$

$r_l = 5$ coladas = 1, 2, 3, 4, 5 réplicas

Las variables respuesta son las siguientes:

Y1 = Medida directa del consumo de energía kWh/ton.Ch.

Y2 = Medida directa del tiempo en minutos.

7.2. Diseño para la Variable Consumo de Energía (Kwh/Ton.Ch) (Y1)

La tabla 8 muestra los resultados del consumo de energía terminada la fusión, implementando el proceso de formación de escoria espumosa. Se trabajo con un peso de chatarra de 40 toneladas para la obtención de estos datos.

Tabla 8. Resultados del consumo de energía

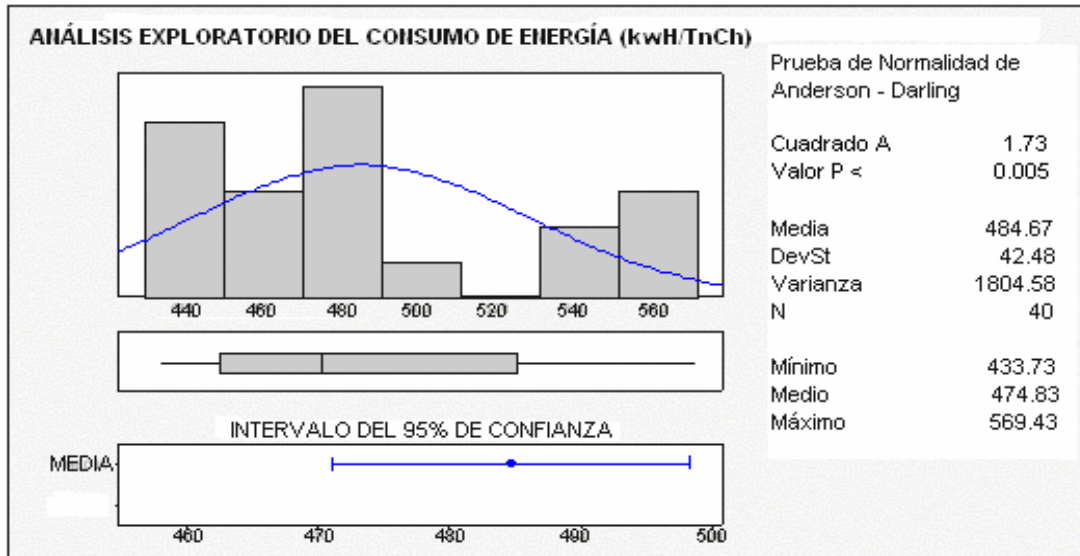
Factor X1	Factor X2	Factor X3	
(Antracita, kg)	(Oxígeno, bares)	(Cal, kg)	
20		1800	2200
		569.4	487.8
	5	558.8	486.5
		564.2	496.7
		559.6	490.1
		552.7	487.6
		474.2	536.4
	8	469.8	533.7
		471.8	541.5
		472.0	536.0
		471.3	552.2

30	5	439.0	453.9
		446.0	454.1
		445.3	456.9
		441.4	457.8
		447.5	455.6
	8	481.3	433.7
		481.7	435.6
		475.4	437.7
		481.5	435.4
		476.2	438.3

7.2.1. Análisis estadístico. En el desarrollo de estos tipos de estudio por lo general se realiza un análisis exploratorio a los datos experimentales, con este procedimiento se trata de detectar si hay valores atípicos (residual que es mucho más grande que cualquier otro). La presencia de uno o más puntos atípicos puede introducir serias distorsiones en el análisis de varianza, por lo que cuando se localiza un punto atípico potencial, se requiere una investigación atenta.

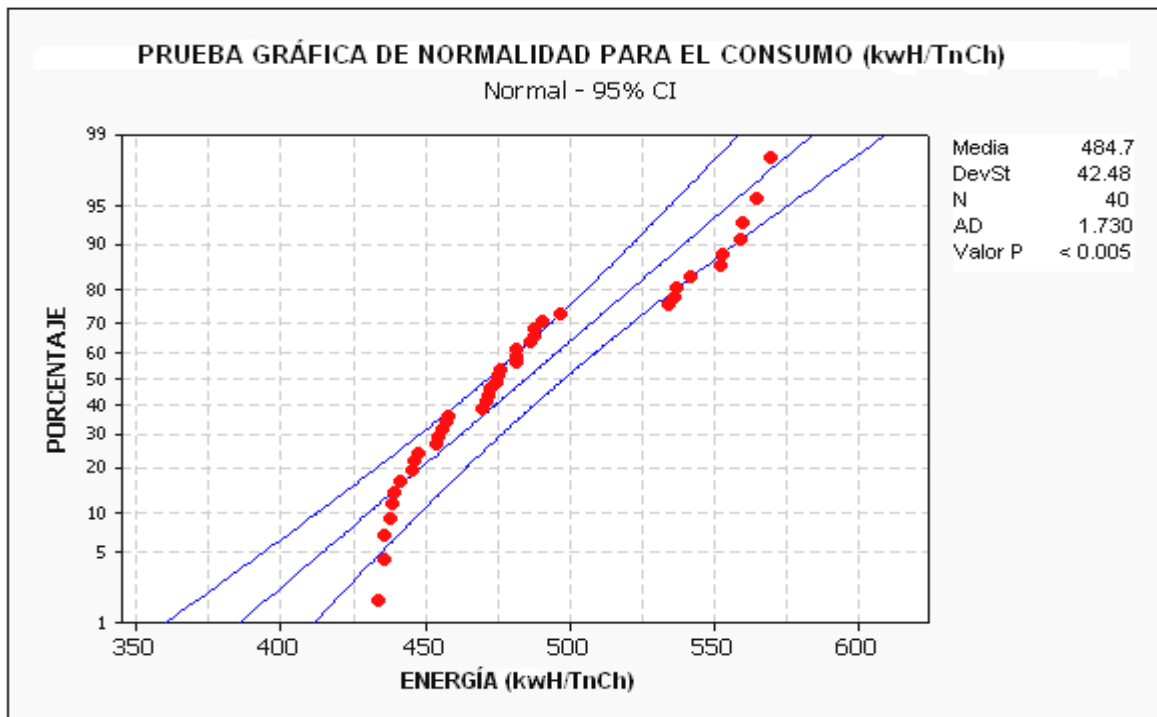
En la figura 5. Se presenta la salida del procedimiento analítico exploratorio utilizando el software MINITAB aplicado al experimento. Podemos mostrar el comportamiento de la variable consumo de energía y así saber si esta se ajusta a una campana, si se ajusta a tal forma se asume que no revela nada particularmente problemático; sin embargo, se puede apreciar que hay un ligero sesgo hacia la derecha, lo cual indica que los datos experimentales no se ajustan a una distribución hipotetizada; por consiguiente se debe realizar un respectivo correctivo o transformación de los datos de tal forma que se ajusten a tal distribución.

Gráfica 5. Gráfica análisis exploratorio del consumo de energía



Para confirmar los resultados del análisis de la figura anterior, Anderson-Darling 8 propone efectuar un segundo análisis a los datos experimentales realizando una gráfica de probabilidad normal. En la figura 6, las observaciones ordenadas pertenecen a la escala porcentual, la cual se ha dispuesto de tal modo que si la distribución hipotetizada describe de manera adecuada los datos, los puntos graficados estarían dentro del rango que comprenden las líneas azules tendiendo a una línea recta, pero como no tiene ese comportamiento, entonces se confirma que los datos no cumplen con los supuestos de normalidad.

Grafica 6. Prueba gráfica de normalidad



En el análisis de varianza, por lo general es más eficaz y útil construir una gráfica de probabilidad normal de los residuales y través de su estudio se pueden descubrir muchos tipos de inadecuaciones del modelo y violaciones de los supuestos mencionados anteriormente. Si la distribución fundamental de los errores es normal, la figura 7 tendrá la apariencia de una línea recta. Para visualizar la línea recta, deberá prestarse más atención a los valores centrales de la gráfica que a los valores extremos.

La figura 7, fue desarrollada por medio del software The SAS System. La salida muestra el análisis de varianza del modelo completo y su respectiva gráfica de probabilidad normal.

The GLM Procedure
 Dependent Variable: ENER

Sum of Source	DF	Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	7	69808.73608	9972.67658	560.78	<.0001
Error	32	569.07016	17.78344		
Corrected Total	39	70377.80624			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	ENER Mean
0.991914	0.870089	4.217042	484.6680

Observe que el resumen del análisis de varianza de la parte superior de la salida del software The SAS System contiene las sumas de cuadrados (“Sum of Squares”), los grados de libertad (“DF”, degrees of freedom), los cuadrados medios (“Mean Square”) y el estadístico de prueba Fo (“F value”) acostumbrados. La columna “Pr > F” es el valor P (de hecho, el límite superior del valor P, ya que las probabilidades menores que 0.0001 se les asigna el valor por omisión 0.0001).

Además del análisis de varianza básico, el programa presenta información adicional útil. La cantidad “R cuadrada” (R-Squared”) se interpreta en términos generales como la proporción de la variabilidad en los datos “explicada” por el modelo del análisis de varianza. Es decir, cerca del 99% de la variabilidad del consumo de la energía es explicada por los tres factores: antracita, oxígeno y la cal. Evidentemente, debe tenerse $0 < R^2 < 1$, siendo más deseables los valores más grandes. El coeficiente de variación (Coeff Var) mide la variabilidad no explicada de los datos como un porcentaje de la media de la variable respuesta, en este caso tiene una variabilidad no explicada del 0.87%.

El valor F del modelo de 560.78 implica que el modelo es altamente significativo, solo hay una probabilidad de 0.01 de que un “valor F del modelo” de esta magnitud pudiera ocurrir debido a ruido, temperatura y humedad del medio ambiente, vibración de los electrodos, etc.

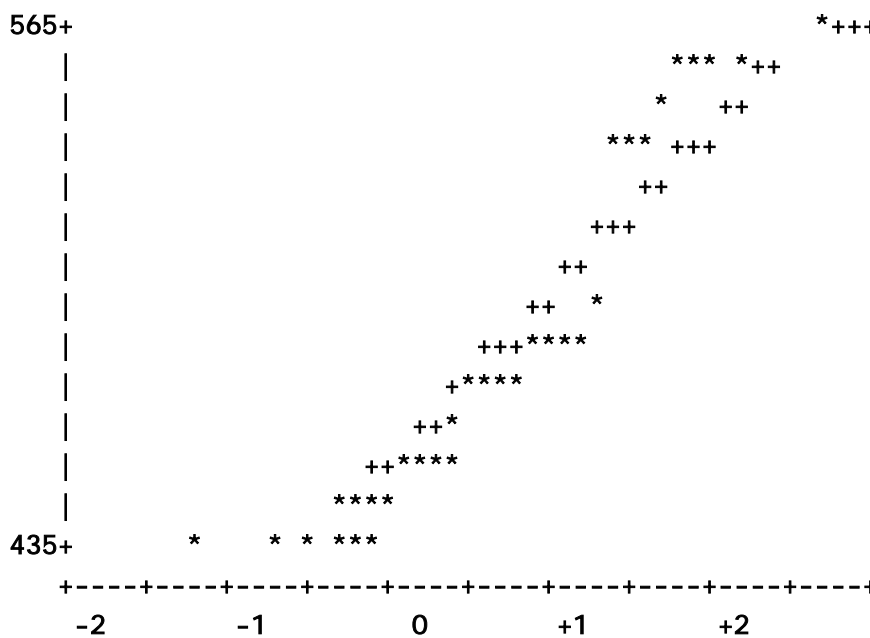
Los valores de $Pr > F$ menores que 0.05 indican que los términos del modelo son significativos. Así como los valores mayores que 0.1 indican que los términos del modelo no son significativos.

Grafica 7. Gráfica de probabilidad normal

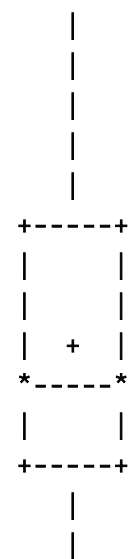
The UNIVARIATE Procedure

Variable: ENER

Normal Probability Plot



Boxplot



En la figura 8, se muestra una vez más que el modelo no es adecuado, debido a que los residuales vs energía tienen estructura, se puede observar que se forma una especie de megáfono o embudo con la boca hacia fuera.

Tabla 9. Valores de energía y sus residuales

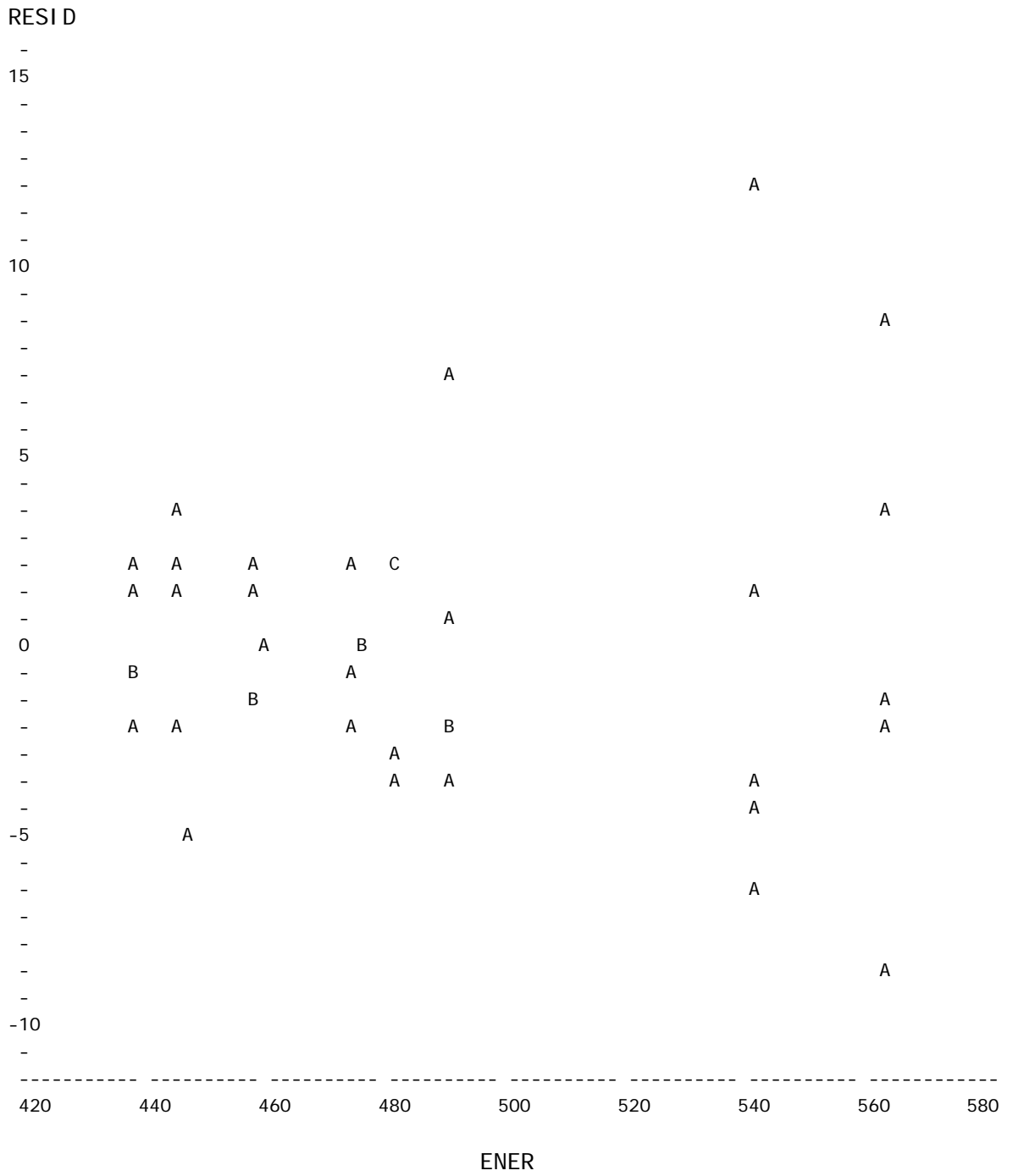
The SAS System

Obs	ANTRA	OXI	CAL	REP	ENER	RESPRED	RESID
1	20	5	1800	1	569.43	560.956	8.474
2	20	5	1800	2	558.84	560.956	-2.116
3	20	5	1800	3	564.20	560.956	3.244
4	20	5	1800	4	559.59	560.956	-1.366
5	20	5	1800	5	552.72	560.956	-8.236
6	20	5	2200	1	439.00	443.822	-4.822
7	20	5	2200	2	446.02	443.822	2.198
8	20	5	2200	3	445.28	443.822	1.458
9	20	5	2200	4	441.35	443.822	-2.472
10	20	5	2200	5	447.46	443.822	3.638
11	20	8	1800	1	474.23	471.824	2.406
12	20	8	1800	2	469.78	471.824	-2.044
13	20	8	1800	3	471.80	471.824	-0.024
14	20	8	1800	4	472.03	471.824	0.206
15	20	8	1800	5	471.28	471.824	-0.544
16	20	8	2200	1	481.25	479.194	2.056
17	20	8	2200	2	481.65	479.194	2.456
18	20	8	2200	3	475.43	479.194	-3.764
19	20	8	2200	4	481.46	479.194	2.266
20	20	8	2200	5	476.18	479.194	-3.014
21	30	5	1800	1	487.80	489.752	-1.952
22	30	5	1800	2	486.45	489.752	-3.302
23	30	5	1800	3	496.73	489.752	6.978
24	30	5	1800	4	490.15	489.752	0.398
25	30	5	1800	5	487.63	489.752	-2.122
26	30	5	2200	1	453.95	455.662	-1.712
27	30	5	2200	2	454.05	455.662	-1.612
28	30	5	2200	3	456.94	455.662	1.278
29	30	5	2200	4	457.79	455.662	2.128
30	30	5	2200	5	455.58	455.662	-0.082
31	30	8	1800	1	536.44	539.972	-3.532

32	30	8	1800	2	533.70	539.972	-6.272
33	30	8	1800	3	541.45	539.972	1.478
34	30	8	1800	4	536.02	539.972	-3.952
35	30	8	1800	5	552.25	539.972	12.278
36	30	8	2200	1	433.73	436.162	-2.432
37	30	8	2200	2	435.62	436.162	-0.542
38	30	8	2200	3	437.70	436.162	1.538
39	30	8	2200	4	435.41	436.162	-0.752
40	30	8	2200	5	438.35	436.162	2.188

Grafica 8. Gráfica de residuales contra valores de energía

PI ot of RESI D*ENER. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.



7.2.2. Adecuación y ajuste del modelo. El enfoque usual para abordar el problema de una varianza no constante que ocurre por las razones expuestas antes, consiste en aplicar una transformación a los datos experimentales para estabilizar la varianza, y luego correr el análisis de varianza en los datos transformados. Se revisaron varios métodos de transformación de los datos experimentales, los cuales fueron:

LENER = Logaritmo natural de la energía

RENER = Raíz cuadrada de la energía

IRENER = Inverso de la raíz cuadrada de la energía

Luego se realiza el análisis exploratorio gráfico a las transformaciones, se comparan sus varianzas y se selecciona la que este más próxima a cero.

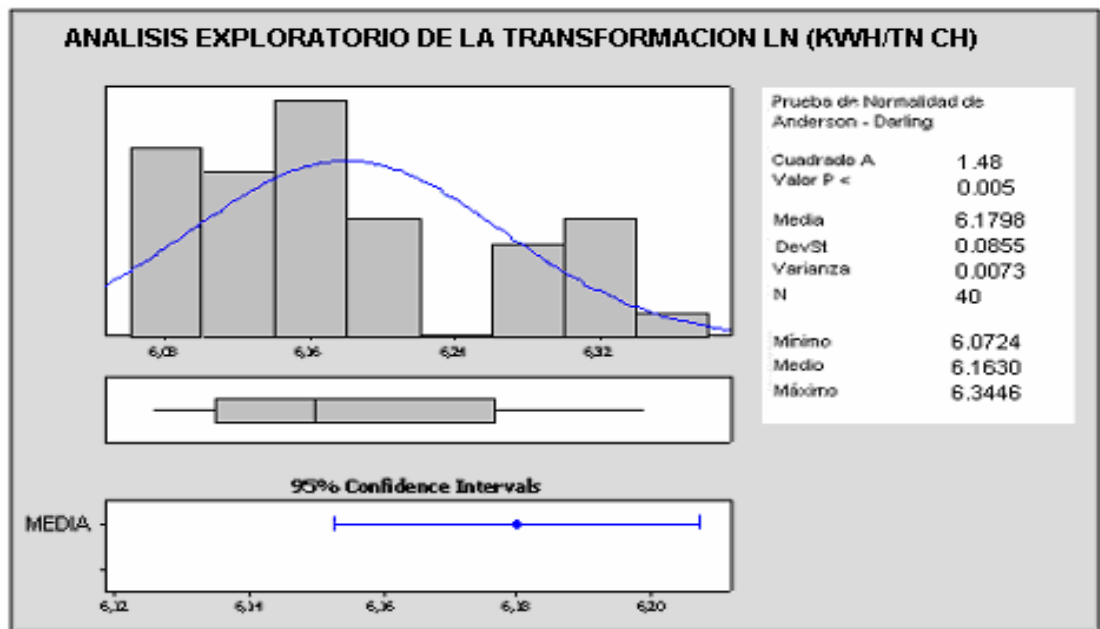
A continuación se presentan los datos tabulados y sus respectivas gráficas (Figuras 9, 10, 11) de las transformaciones realizadas:

Tabla 10. Valores de energía transformados

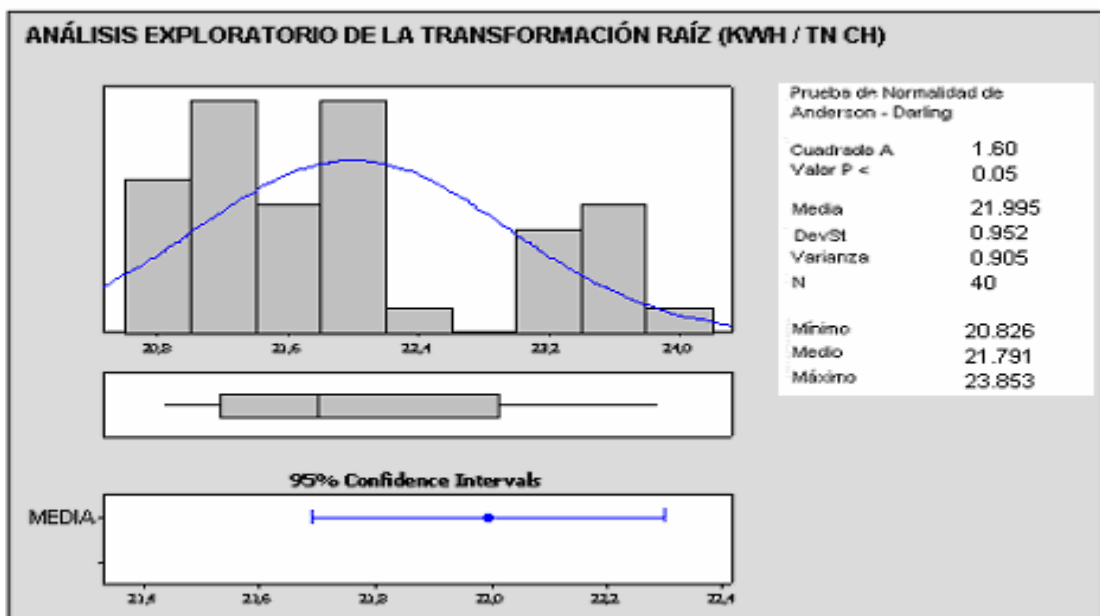
Obs	ANTR	OXI	CAL	REP	ENER	LENER	RENER	IRENER
1	20	5	1800	1	569.43	634.464	238.627	0.041906
2	20	5	1800	2	558.84	632.586	236.398	0.042302
3	20	5	1800	3	564.20	633.541	237.529	0.042100
4	20	5	1800	4	559.59	632.720	236.557	0.042273
5	20	5	1800	5	552.72	631.485	235.100	0.042535
6	20	5	2200	1	439.00	608.450	209.523	0.047727
7	20	5	2200	2	446.02	610.036	211.192	0.047350
8	20	5	2200	3	445.28	609.870	211.017	0.047390
9	20	5	2200	4	441.35	608.984	210.083	0.047600
10	20	5	2200	5	447.46	610.359	211.533	0.047274
11	20	8	1800	1	474.23	616.169	217.768	0.045920
12	20	8	1800	2	469.78	615.226	216.744	0.046137
13	20	8	1800	3	471.80	615.656	217.210	0.046038
14	20	8	1800	4	472.03	615.704	217.263	0.046027
15	20	8	1800	5	471.28	615.545	217.090	0.046064
16	20	8	2200	1	481.25	617.639	219.374	0.045584

17	20	8	2200	2	481.65	617.722	219.465	0.045565
18	20	8	2200	3	475.43	616.422	218.044	0.045862
19	20	8	2200	4	481.46	617.682	219.422	0.045574
20	20	8	2200	5	476.18	616.580	218.215	0.045826
21	30	5	1800	1	487.80	618.991	220.862	0.045277
22	30	5	1800	2	486.45	618.713	220.556	0.045340
23	30	5	1800	3	496.73	620.805	222.874	0.044868
24	30	5	1800	4	490.15	619.471	221.393	0.045168
25	30	5	1800	5	487.63	618.956	220.823	0.045285
26	30	5	2200	1	453.95	611.799	213.061	0.046935
27	30	5	2200	2	454.05	611.821	213.084	0.046930
28	30	5	2200	3	456.94	612.455	213.762	0.046781
29	30	5	2200	4	457.79	612.641	213.960	0.046738
30	30	5	2200	5	455.58	612.157	213.443	0.046851
31	30	8	1800	1	536.44	628.495	231.612	0.043176
32	30	8	1800	2	533.70	627.983	231.019	0.043286
33	30	8	1800	3	541.45	629.425	232.691	0.042975
34	30	8	1800	4	536.02	628.417	231.521	0.043193
35	30	8	1800	5	552.25	631.400	235.000	0.042553
36	30	8	2200	1	433.73	607.242	208.262	0.048016
37	30	8	2200	2	435.62	607.677	208.715	0.047912
38	30	8	2200	3	437.70	608.153	209.213	0.047798
39	30	8	2200	4	435.41	607.629	208.665	0.047924
40	30	8	2200	5	438.35	608.302	209.368	0.047763

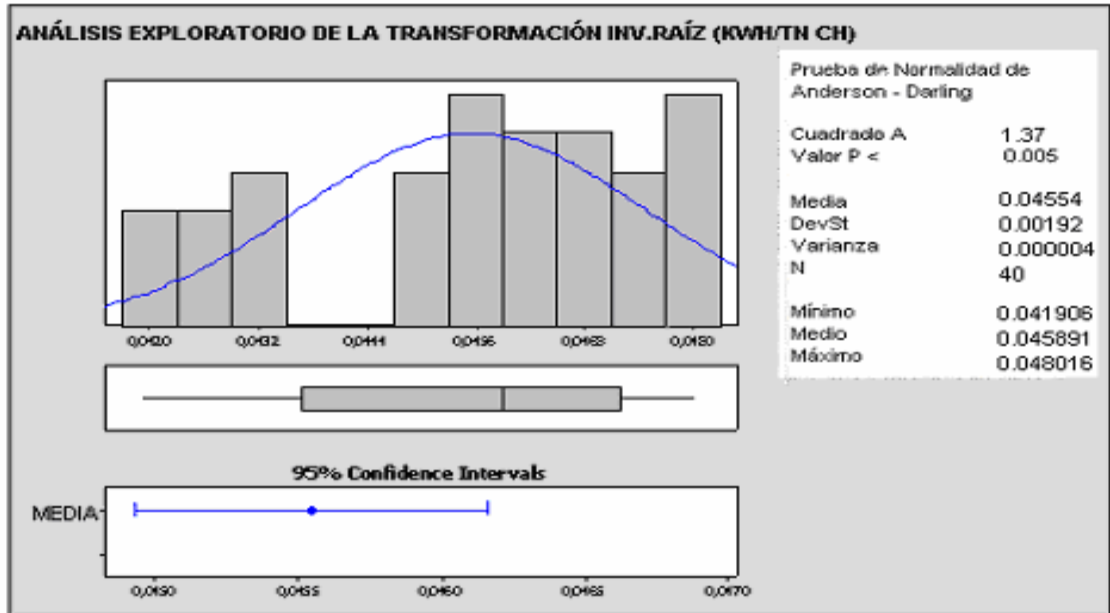
Grafica 9. Gráfica del análisis exploratorio de la transformación Logaritmo natural



Grafica 10. Gráfica del análisis exploratorio de la transformación raíz cuadrada



Grafica 11. Gráfica del análisis exploratorio de la transformación inv. de la raíz cuadrada



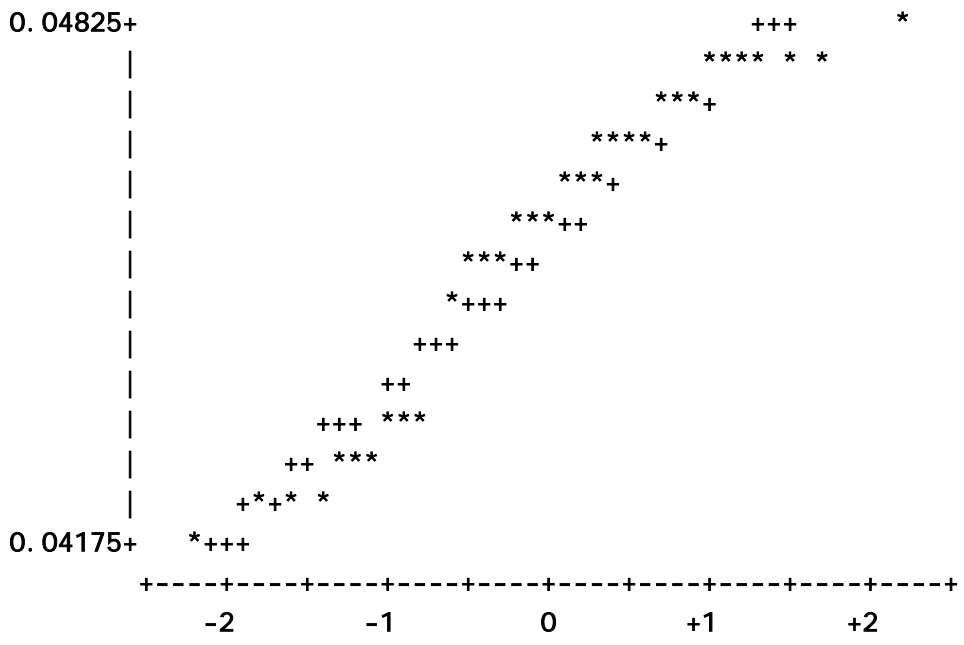
Se concluye que la gráfica más apropiada y que además satisface el valor de la varianza es la transformación inversa de la raíz cuadrada; sin embargo, antes de proceder a presentar las conclusiones del análisis de varianza de esta transformación, se debe verificar la adecuación del modelo transformado. Como se hizo anteriormente, la herramienta primaria de diagnóstico es el análisis residual.

En la figura 12, se presenta la gráfica de probabilidad normal de residuales. Esta gráfica parece ser satisfactoria en cuanto a que se asemeja a una línea recta. Se construye después la gráfica de los residuales contra la variable respuesta transformada y se revela que estos datos no presentan ninguna estructura definida (Figura 13). En conclusión el modelo transformado inverso de la raíz cuadrada es adecuado y además no se observa ningún problema, por ejemplo un error de transformación de datos, por lo que estas respuestas se aceptan como legítimas.

Grafica 12. Gráfica de probabilidad normal del inv. de la raíz cuadrada de la energía

The UNIVARIATE Procedure
 Variable: IRENER

Normal Probability Plot



Boxplot

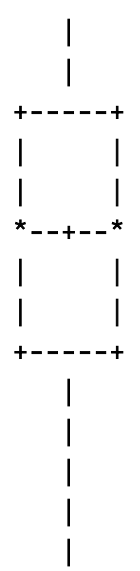
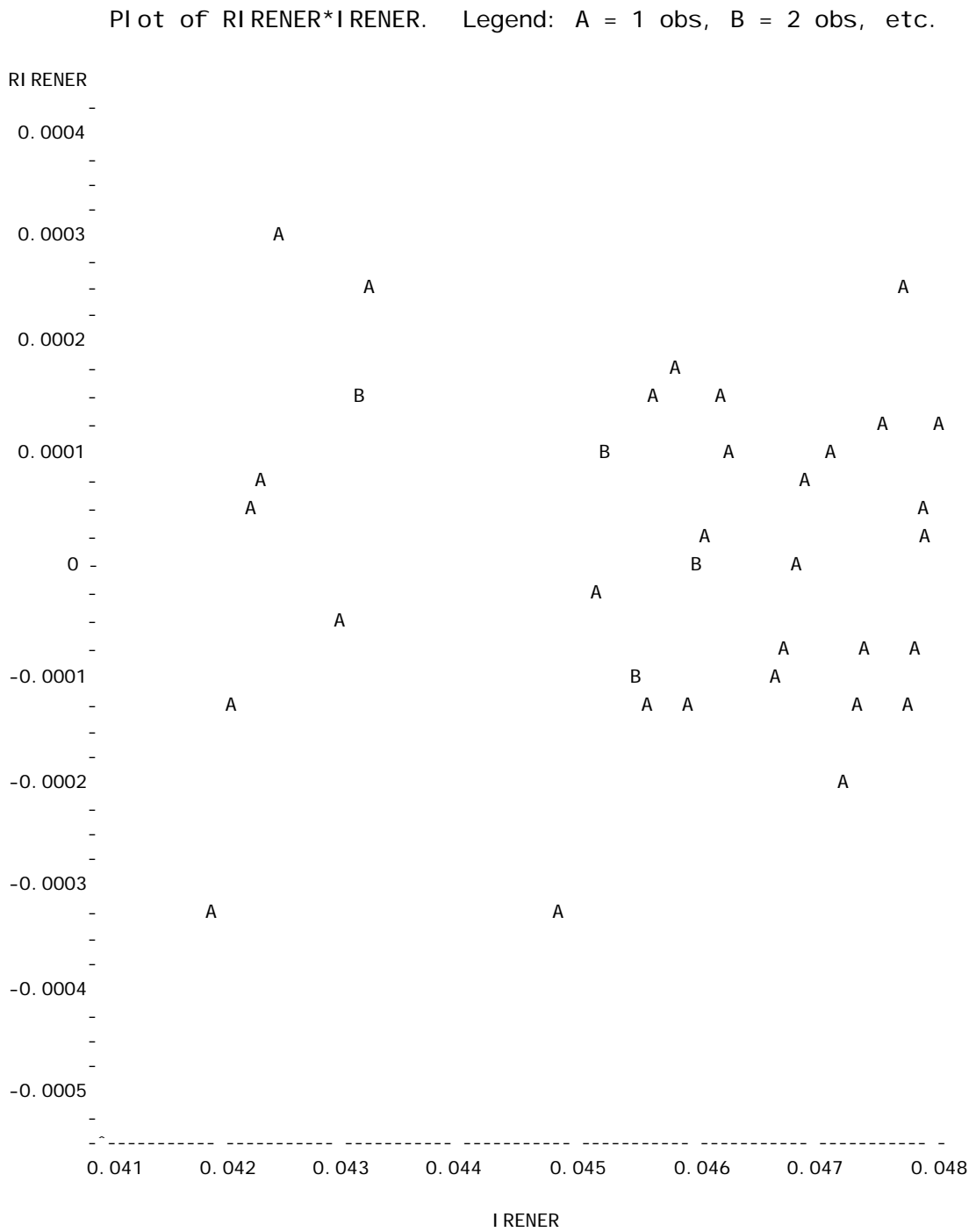


Tabla 11. Valores del inverso de la raíz cuadrada de la energía y sus residuales

Obs	ANTR	OXI	CAL	REP	ENER	Observed	Predicted	Residual
1	20	5	1800	1	569.43	0.0419063	0.0422232	-0.0003169
2	20	5	1800	2	558.84	0.0423015	0.0422232	0.0000782
3	20	5	1800	3	564.20	0.0421001	0.0422232	-0.0001231
4	20	5	1800	4	559.59	0.0422731	0.0422232	0.0000499
5	20	5	1800	5	552.72	0.0425351	0.0422232	0.0003118
6	20	5	2200	1	439.00	0.0477274	0.0474683	0.0002590
7	20	5	2200	2	446.02	0.0473503	0.0474683	-0.0001180
8	20	5	2200	3	445.28	0.0473896	0.0474683	-0.0000786
9	20	5	2200	4	441.35	0.0476001	0.0474683	0.0001318
10	20	5	2200	5	447.46	0.0472740	0.0474683	-0.0001942
11	20	8	1800	1	474.23	0.0459203	0.0460374	-0.0001170
12	20	8	1800	2	469.78	0.0461373	0.0460374	0.0000998
13	20	8	1800	3	471.80	0.0460384	0.0460374	0.0000010
14	20	8	1800	4	472.03	0.0460272	0.0460374	-0.0000102
15	20	8	1800	5	471.28	0.0460638	0.0460374	0.0000264
16	20	8	2200	1	481.25	0.0455842	0.0456824	-0.0000982
17	20	8	2200	2	481.65	0.0455653	0.0456824	-0.0001172
18	20	8	2200	3	475.43	0.0458623	0.0456824	0.0001799
19	20	8	2200	4	481.46	0.0455742	0.0456824	-0.0001082
20	20	8	2200	5	476.18	0.0458262	0.0456824	0.0001437
21	30	5	1800	1	487.80	0.0452771	0.0451877	0.0000893
22	30	5	1800	2	486.45	0.0453399	0.0451877	0.0001521
23	30	5	1800	3	496.73	0.0448683	0.0451877	-0.0003194
24	30	5	1800	4	490.15	0.0451684	0.0451877	-0.0000193
25	30	5	1800	5	487.63	0.0452850	0.0451877	0.0000972
26	30	5	2200	1	453.95	0.0469349	0.0468468	0.0000880
27	30	5	2200	2	454.05	0.0469297	0.0468468	0.0000828
28	30	5	2200	3	456.94	0.0467811	0.0468468	-0.0000657
29	30	5	2200	4	457.79	0.0467376	0.0468468	-0.0001092
30	30	5	2200	5	455.58	0.0468508	0.0468468	0.0000040
31	30	8	1800	1	536.44	0.0431757	0.0430366	0.0001390
32	30	8	1800	2	533.70	0.0432863	0.0430366	0.0002497
33	30	8	1800	3	541.45	0.0429754	0.0430366	-0.0000611
34	30	8	1800	4	536.02	0.0431926	0.0430366	0.0001559
35	30	8	1800	5	552.25	0.0425531	0.0430366	-0.0004834
36	30	8	2200	1	433.73	0.0480164	0.0478826	0.0001337
37	30	8	2200	2	435.62	0.0479122	0.0478826	0.0000295
38	30	8	2200	3	437.70	0.0477982	0.0478826	-0.0000844
39	30	8	2200	4	435.41	0.0479237	0.0478826	0.0000410
40	30	8	2200	5	438.35	0.0477627	0.0478826	-0.0001199

Grafica 13. Gráfica de residuales contra inv. de la raíz cuadrada de la energía

Plot of RIRENER*IRENER. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.



Retomando el tema del análisis de varianza se presenta a continuación el resumen para la transformación el inverso de la raíz cuadrada.

Dependent Variable: IRENER

Source	DF	Squares	Sum of Mean Square	F Value	Pr > F
Model	7	0.00014287	0.00002041	630.52	<.0001
Error	32	0.00000104	0.00000003		
Corrected Total	39	0.00014390			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	IRENER Mean
0.992802	0.395022	0.000180	0.045546

Según el análisis de varianza, se puede observar que:

La cantidad “R cuadrada” (R-Squared”) representa que cerca del 99.3% de la variabilidad del consumo de la energía es explicada por los tres factores: antracita, oxígeno y la cal.

El coeficiente de variación (Coeff Var) como ya se mencionó mide la variabilidad no explicada de los datos como un porcentaje de la media de la variable respuesta, en este caso tiene una variabilidad no explicada del 0.39%.

El valor F del modelo es 630.52, implica que el modelo es altamente significativo, solo hay una probabilidad de 0.01 de que un “valor F del modelo” de esta magnitud pudiera ocurrir debido a ruido, temperatura y humedad del medio ambiente, vibración de los electrodos, etc.

7.2.3. Modelo de regresión. Con un modelo de regresión se busca desarrollar un modelo empírico que relacione el consumo de energía con antracita (kg), oxígeno (bares) y cal (kg). El modelo que describe esta relación es:

$$Y^* = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{123} X_1 X_2 X_3 + \varepsilon \quad (4)$$

donde Y^* representa la energía (transformada), X_1 antracita (kg), X_2 oxígeno (bares) y X_3 cal (kg).

Se trata de un modelo de regresión lineal múltiple con tres variables independientes. Es común llamar a las variables independientes variables predictoras o regresores (variables de regresión). Se utiliza el término lineal porque la ecuación 4 es una función lineal de los parámetros desconocidos β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_{12} , β_{13} , β_{23} y β_{123} independientemente de la forma de superficie de respuesta que genera.

Las β de este modelo se estimaron usando el software The SAS System, los cuales pertenecen a la columna Parameter Estimates del análisis que se muestra a continuación:

The SAS System

The REG Procedure

Dependent Variable: Y IRENER

Parameter Estimates

Variable	Label	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t
Intercept	Intercept	1	-0.21963	0.00648	-33.88	<.0001
X1	ANTRA	1	0.00949	0.00025428	37.34	<.0001
X2	OXI	1	0.04001	0.00097184	41.17	<.0001
X3	CAL	1	0.00012760	0.00000323	39.56	<.0001
Z1	ANTRA*OXI	1	-0.00152	0.00003812	-39.79	<.0001
Z2	ANTRA*CAL	1	-0.00000456	1.265108E-7	-36.03	<.0001
Z3	OXI *CAL	1	-0.00001931	4.835087E-7	-39.94	<.0001
Z4	ANTRA*OXI *CAL	1	7.322473E-7	1.896477E-8	38.61	<.0001

Los valores de los parámetros estimados son reemplazados en la ecuación (4), dando como resultado la ecuación (5) a la cual se le asignan los valores de los dos niveles de cada factor, resultando así seis ecuaciones (6, 7, 8, 9, 10, 11). Con cada una de las ecuaciones se analiza su respectiva gráfica de superficie de respuesta.

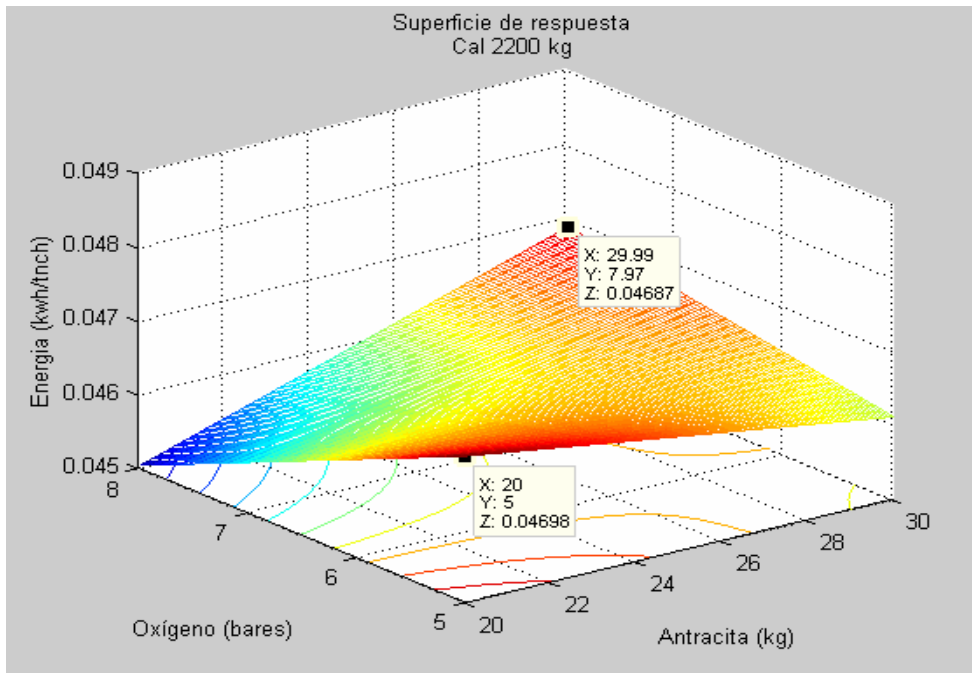
El objetivo del método de superficie de respuesta es encontrar una aproximación adecuada de la verdadera relación funcional entre la energía y el conjunto de las variables independientes (antracita, oxígeno, cal) y a sí mismo encontrar las mejores condiciones de operación.

$$Y^* = -0.21963 + 0.00949 X1 + 0.04001X2 + 0.00012760X3 - 0.00152X1X2 - 0.00000456X1X3 - 0.00001931X2X3 + 7.322473E-7X1X2X3 + \epsilon$$

(5)

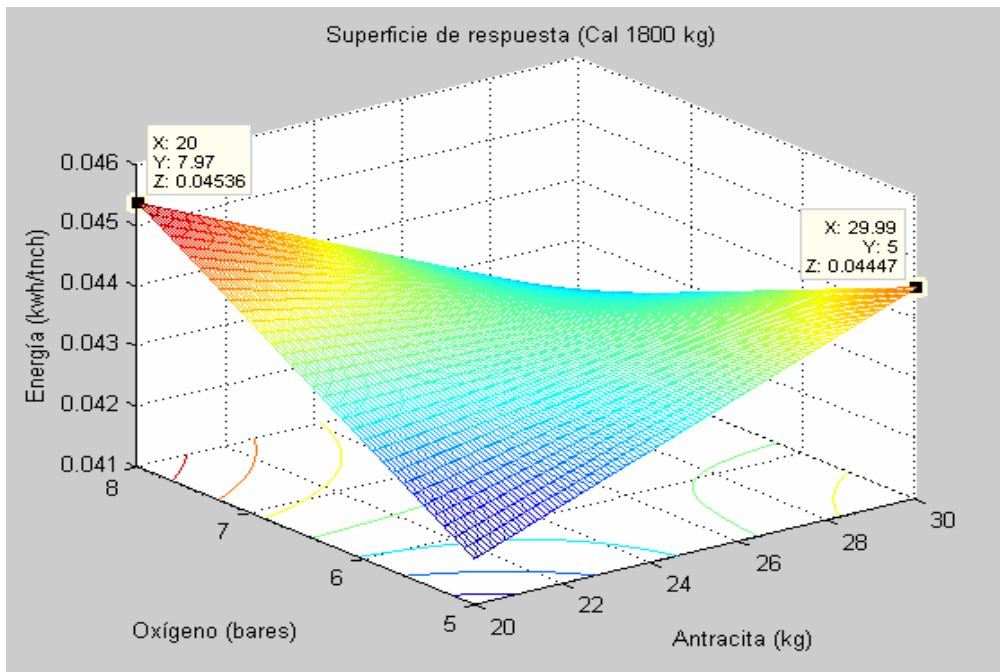
$$Y^*1 = 0.06109 - 5.42 \cdot 10^{-4} X1 - 2.472 \cdot 10^{-3} X2 + 9.094406 \cdot 10^{-5} X1 X2$$

(6)



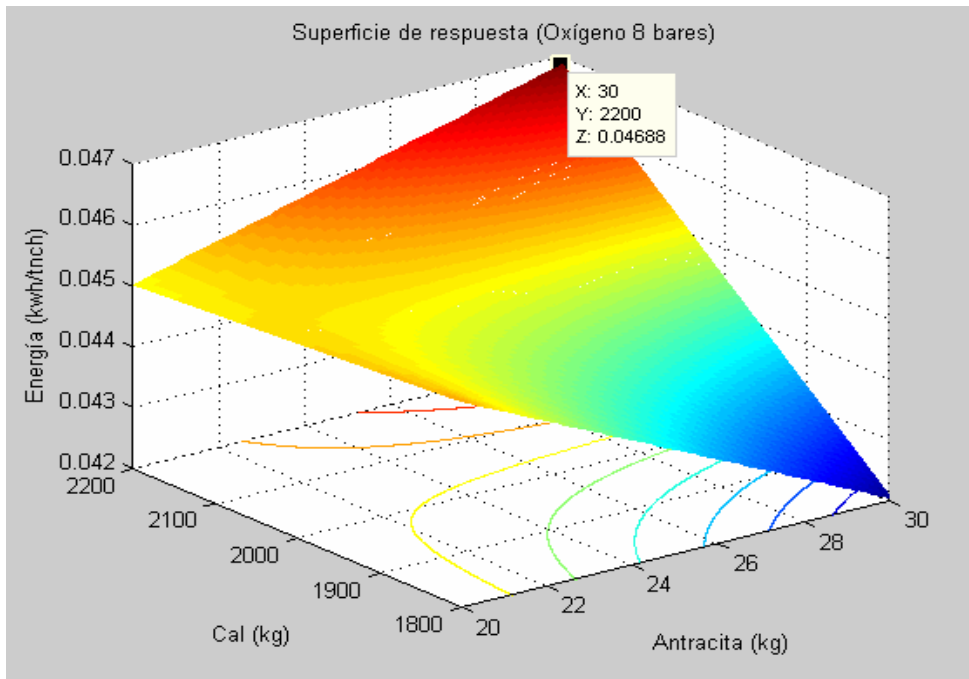
$$Y^*2 = 0.01005 + 1.282 \cdot 10^{-3} X1 - 5.252 \cdot 10^{-3} X2 - 2.0195486 \cdot 10^{-4} X1 X2$$

(7)



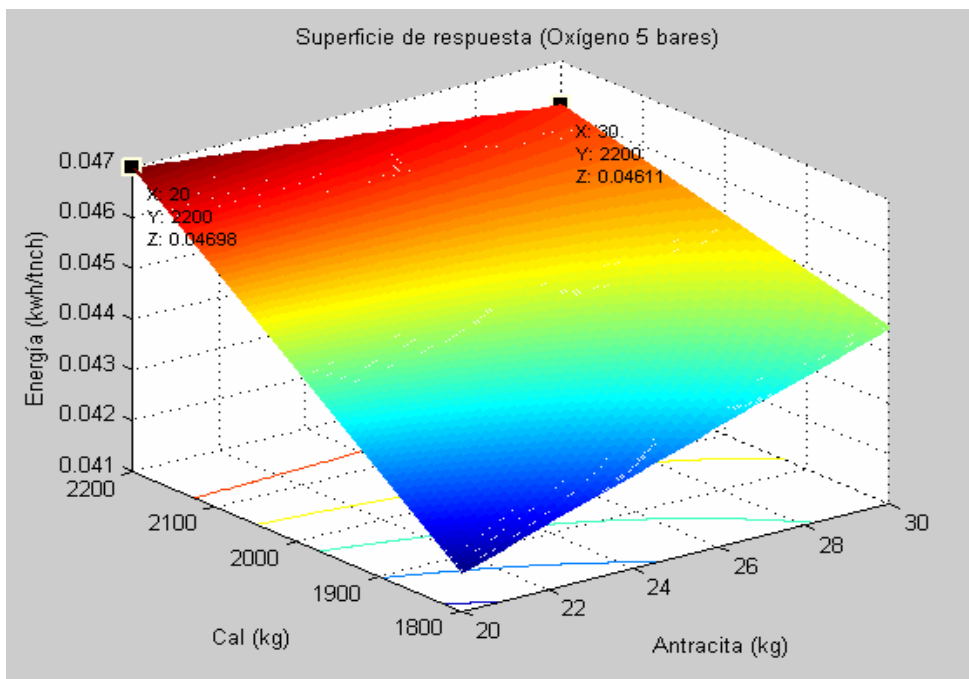
$$Y^3 = 0.10045 - 2.67 \cdot 10^{-3} X_1 - 2.688 \cdot 10^{-5} X_3 + 1.2979784 \cdot 10^{-6} X_1 X_3$$

(8)



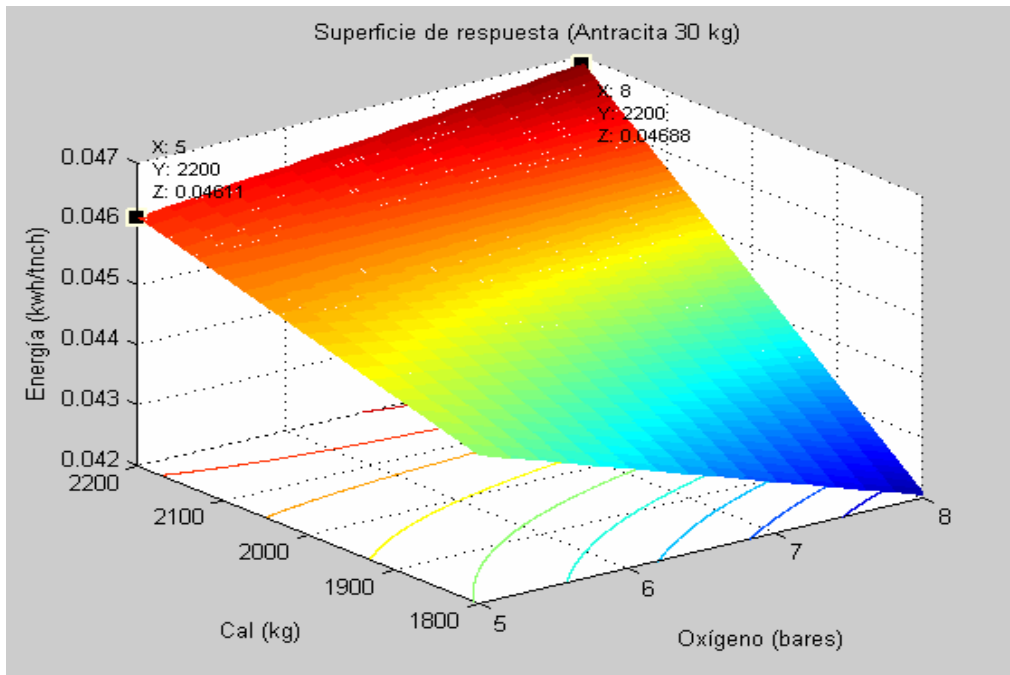
$$Y^4 = 0.01958 + 1.89 \cdot 10^{-3} X_1 + 3.105 \cdot 10^{-5} X_3 - 8.987635 \cdot 10^{-7} X_1 X_3$$

(9)



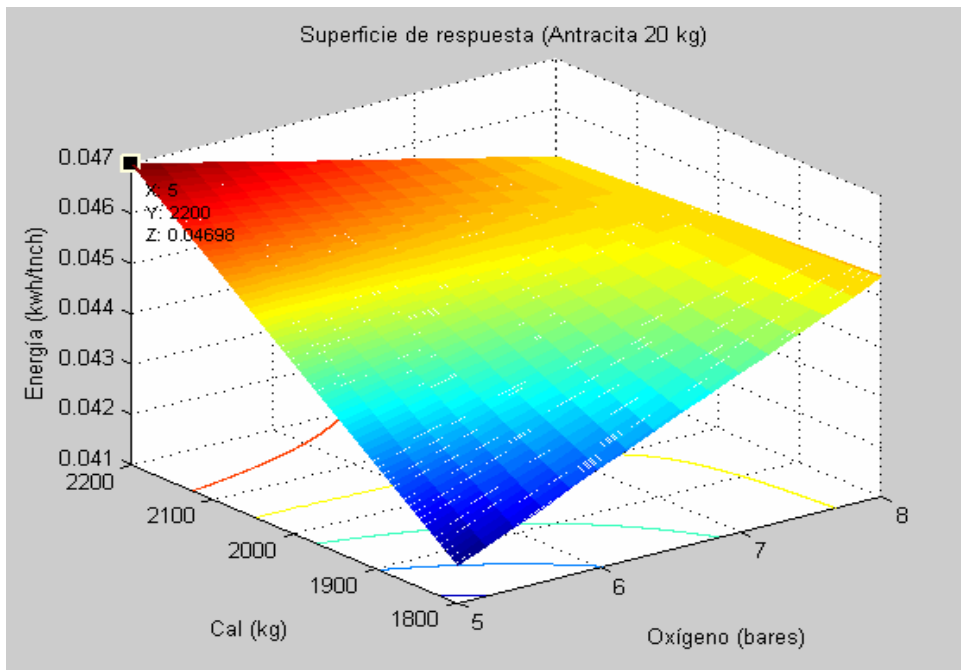
$$Y^*5 = 0.06507 - 5.59 \cdot 10^{-3} X_2 - 9.2 \cdot 10^{-6} X_3 + 2.657419 \cdot 10^{-6} X_2 X_3$$

(10)



$$Y^*6 = 0.02983 + 9.61 \cdot 10^{-3} X_2 + 3.64 \cdot 10^{-5} X_3 - 4.665054 \cdot 10^{-6} X_2 X_3$$

(11)



Es necesario aclarar que luego de analizar las anteriores graficas, las cuales son la base para continuar con el análisis, se debe hacer la transformación de los (Y*) a valores reales (Y) para entonces plantear los resultados y conclusiones; la transformación esta dada por la ecuación (12).

$$Y = \frac{1}{\sqrt{Y^*}}$$

(12)

Donde, Y representa los datos del consumo de energía y Y* representa los datos ajustados del consumo de energía usando la transformación inversa de la raíz cuadrada.

7.3. Diseño para la Variable Tiempo Neto de Operacion (Min.) (Y2)

La tabla 12 muestra los resultados del tiempo neto de operación terminada la fusión, implementando el proceso de formación de escoria espumosa. El tiempo neto se obtuvo tomando el tiempo total de fusión y restándole las demoras en el tiempo de fusión.

Tabla 12. Resultados del tiempo de operación

Factor A	Factor B	Factor C	
(Antracita kg)	(Oxígeno bares)	(Cal kg)	
		1800	2200
20	5	136,0	195,0
		170,0	135,0
		180,0	190,0

30		215,0	150,0
		208,0	187,0
	8	185,0	215,0
		195,0	145,0
		190,0	202,0
		190,0	218,0
		200,0	175,0
		160,0	160,0
	5	184,0	140,0
		190,0	115,0
		160,0	135,0
		190,0	180,0
		175,0	175,0
	8	185,0	139,0
265,0		185,0	
176,0		165,0	
149,0		180,0	

Luego de realizar un análisis exploratorio a los datos experimentales de la variable tiempo de operación y teniendo en cuenta que a los datos de la variable consumo de energía se les realizó la transformación inversa de la raíz cuadrada, se intentó la misma adecuación para esta variable.

A pesar que no se mencionan las demás transformaciones, los datos arrojados por el software para cada una de ellas mostraron de manera similar que esta variable no es significativa. Solo con el objeto de ilustrar, se presenta el análisis de varianza de la transformación inversa de la raíz cuadrada:

Analysis of Variance

Source	DF	Squares	Sum of Square	Mean F Value	Pr > F
Model	3	0.00037081	0.00012360	3.82	0.0180
Error	36	0.00117	0.00003240		
Corrected Total	39	0.00154			

Root MSE	0.00569	R-Square	0.2412
Dependent Mean	0.07585	Adj R-Sq	0.1780
Coeff Var	7.50438		

La cantidad “R cuadrada” (R-Squared”) se interpreta en términos generales como la proporción de la variabilidad en los datos “explicada” por el modelo del análisis de varianza. Es decir, cerca del 24.1% de la variabilidad del tiempo de operación es explicada por los tres factores: antracita, oxígeno y la cal. Evidentemente, se debe tener $0 < R^2 < 1$, siendo más deseables los valores más grandes. El coeficiente de variación (Coeff Var) en este caso tiene una variabilidad no explicada del 7.5%.

El valor F del modelo de 3.82 implica que el modelo no es significativo, hay una probabilidad de 1.8 de que un “valor F del modelo” de esta magnitud pudiera ocurrir debido a factores externos como por ejemplo: ruido, temperatura y humedad del medio ambiente, vibración de los electrodos, etc. Los valores de $Pr > F$ menores que 0.05 indican que los términos del modelo son significativos. De la misma manera, los valores mayores que 0.1 indican que los términos del modelo no son significativos.

The SAS System

The RSREG Procedure

Label	Factor	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
ANTRA	X1	3	0.000150	0.000050071	1.51	0.2305
OXI	X2	3	0.000158	0.000052578	1.58	0.2118
CAL	X3	3	0.000205	0.000068222	2.06	0.1252

El modelo que relaciona la variable tiempo de operación con la antracita, oxígeno y cal se describe a continuación:

$$T^* = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon \quad (13)$$

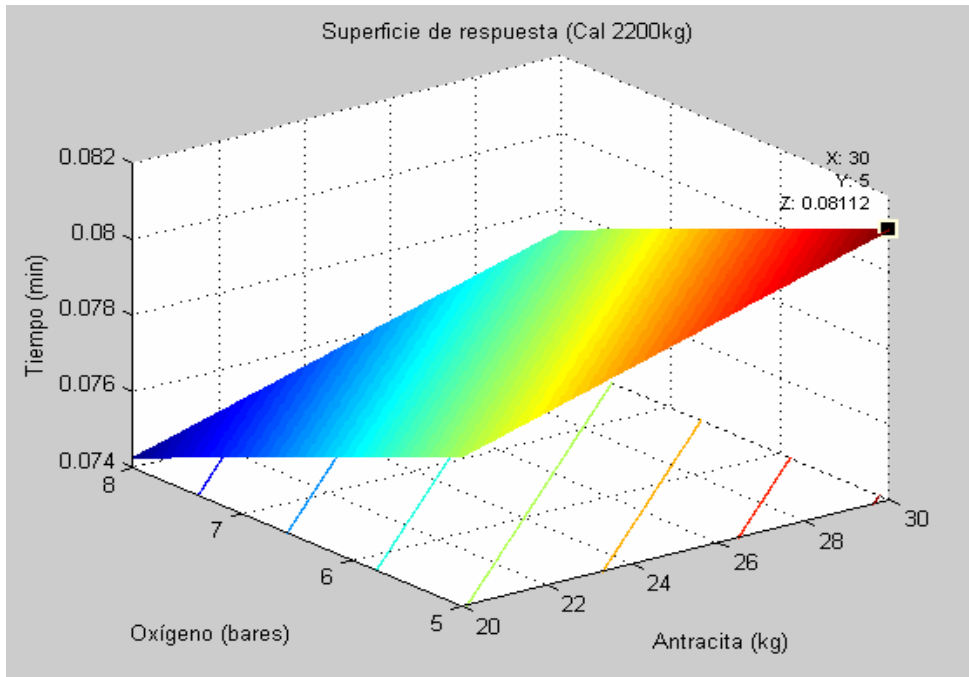
Parameter Estimates

Variabl e	Label	DF	Parameter Estimate	Standard Error
Intercept	Intercept	1	0.05760	0.01083
X1	ANTRA	1	0.00031566	0.00017999
X2	OXI	1	-0.00123	0.00059998
X3	CAL	1	0.00000918	0.00000450

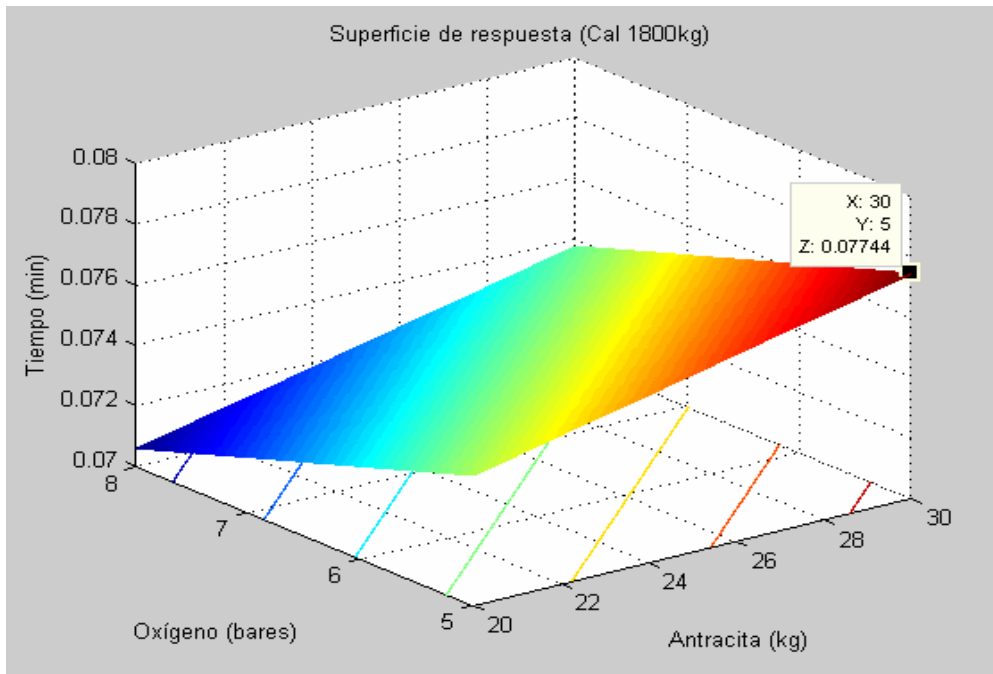
Los valores de los parámetros estimados son reemplazados en la ecuación (13), dando como resultado la ecuación (14) a la cual se le asignan los valores de los dos niveles de cada factor, resultando así seis ecuaciones (15,16,17,18,19,20), cada una de estas tiene su respectiva gráfica de superficie de respuesta.

$$T^* = 0.05760 + 0.00031566X_1 - 0.00123X_2 + 0.00000918X_3 \quad (14)$$

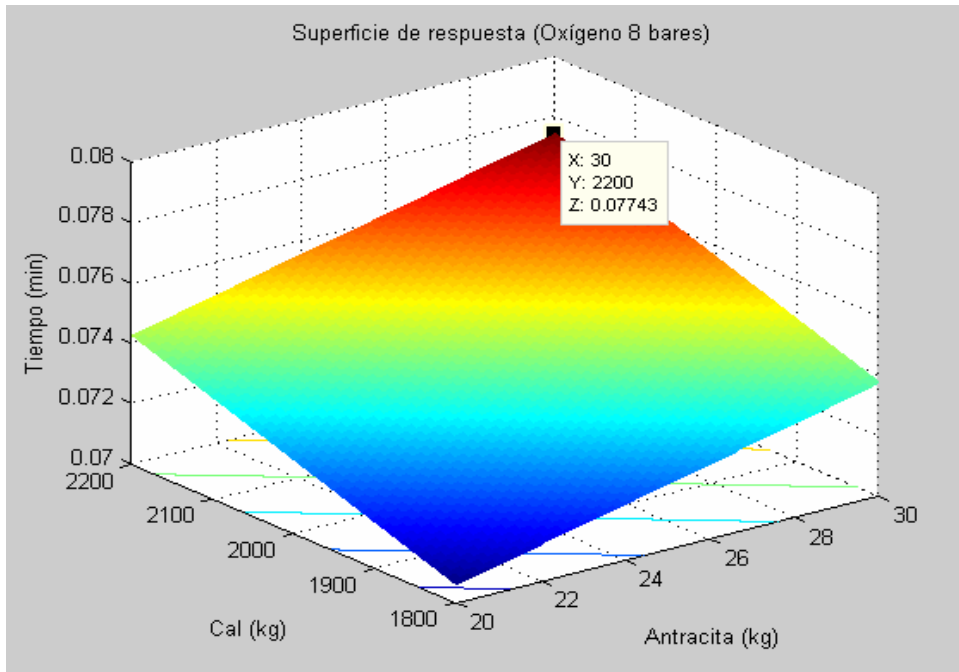
$$T1 = 0.077796 + 0.00031566X1 - 0.00123X2 \quad (15)$$



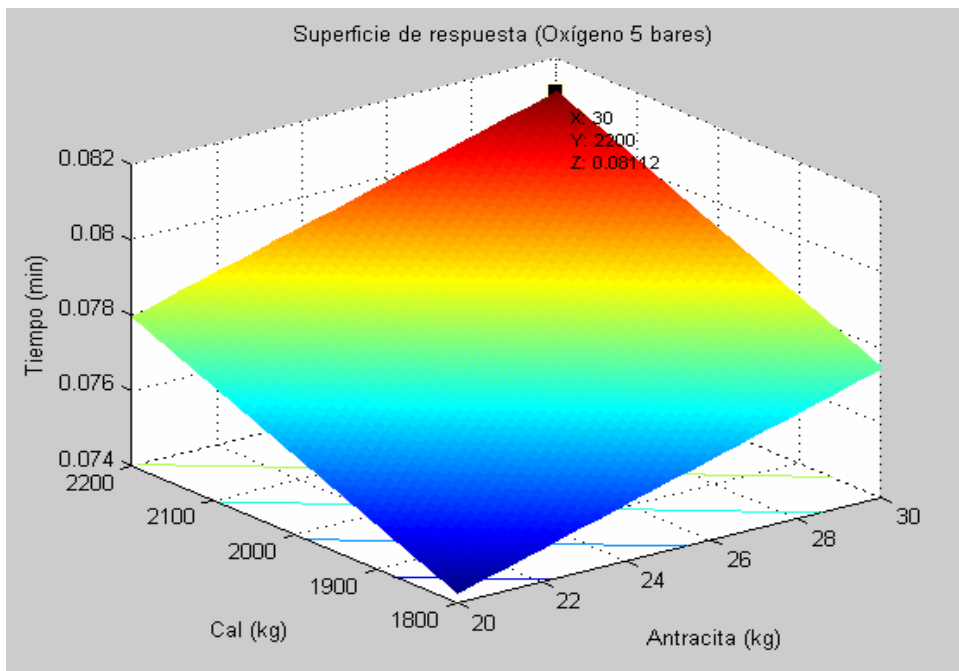
$$T2 = 0.074124 + 0.00031566X1 - 0.00123X2 \quad (16)$$



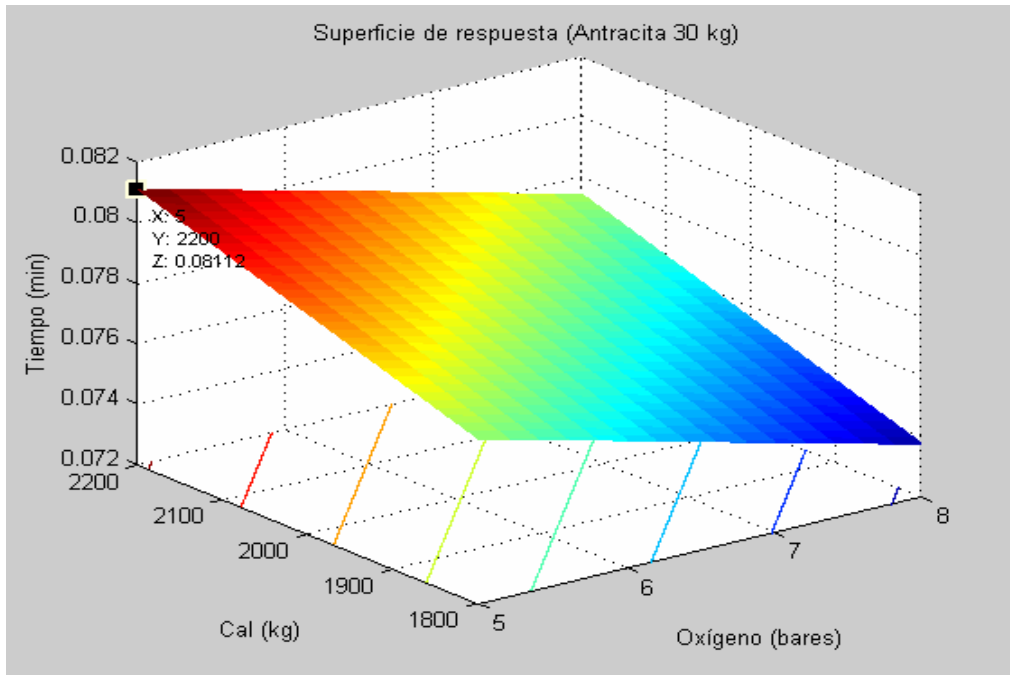
$$T3 = 0.04776 + 0.00031566X1 + 0.00000918X3 \quad (17)$$



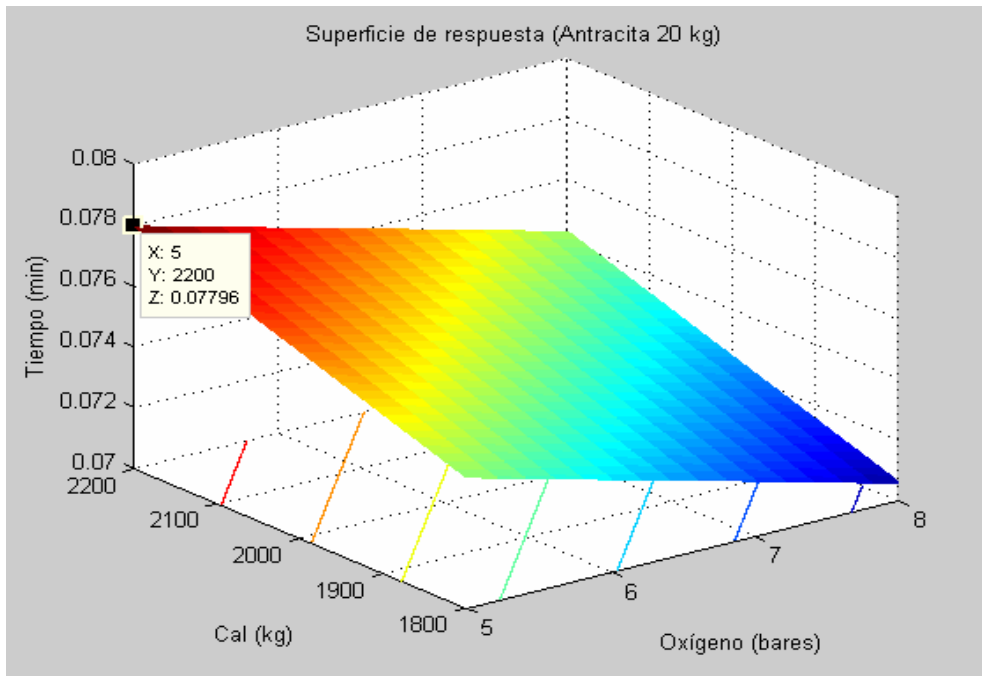
$$T4 = 0.05145 + 0.00031566X1 + 0.00000918X3 \quad (18)$$



$$T5 = 0.0670698 - 0.00123X^2 + 0.00000918X^3 \quad (19)$$



$$T6 = 0.0639131 - 0.00123X^2 + 0.00000918X^3 \quad (20)$$



Es necesario aclarar que, luego de analizar las graficas anteriores, las cuales son la base para continuar con el análisis, se debe hacer la transformación de los (T^*) a valores reales (T) para luego obtener los resultados y conclusiones. La transformación empleada (inverso de la raíz cuadrada) esta dada por la ecuación (21).

$$T = \frac{1}{\sqrt{T^*}} \quad (21)$$

Donde, T representa los datos del Tiempo de operación y T^* representa los datos ajustados del tiempo de operación usando la transformación inversa de la raíz cuadrada.

7.4. Conclusiones Generales del Diseño Experimental

El consumo de energía medido en kwh/tnch se dio en el siguiente orden creciente de combinaciones o procedimientos:

(c) = 452,	(abc) = 455,	(ac) = 470,	(b) = 485,
(bc) = 493,	(a) = 505,	(ab) = 565,	(1) = 573.

La combinación que da el menor consumo de energía es c (que corresponde a los valores de las variables X_1 , X_2 y X_3 de 20, 5, 2200 respectivamente). Como se observa, no hay gran diferencia con abc (30, 8, 2200); sin embargo, si se utilizara esta última, se incrementarían los costos de antracita inyectada, y por lo tanto se considera más conveniente elegir la primera combinación de valores de las variables.

Respecto al tiempo, se tienen los siguientes resultados en orden creciente y cuya mejor combinación es (ac):

$$(ac) = 151$$

$$(1) = 181$$

$$(c) = 164$$

$$(bc) = 181$$

$$(a) = 166$$

$$(ab) = 183$$

$$(abc) = 166$$

$$(b) = 200$$

8. MARCHA GENERAL PARA LA FABRICACION DE ACERO EN EL HORNO ELECTRICO DE ARCO CON FORMACION DE ESCORIAS ESPUMOSA

A continuación se presenta el procedimiento para implementar la formación de escoria espumosa en el proceso de fabricación de acero en el horno eléctrico de arco de Acerías Paz del Río S.A.

Los pasos a seguir en su orden son los siguientes:

Cargar antes de la primera cesta de chatarra 1000 a 1400 kg de cal en roca si la solera está desgastada y en la segunda cesta de chatarra si la solera está normal.

Cargue 1ª cesta, fundir en TAP N° 1, inyectar oxígeno para ayudar a la fusión, una vez los electrodos hayan penetrado en la chatarra se debe pasar a TAP N° 2.

Cargue 2ª cesta, fundir en TAP N° 1, inyectar oxígeno para acelerar la fusión, una vez los electrodos hayan penetrado en la chatarra se debe pasar a TAP N° 2. Antes de terminar la fusión de la chatarra proyectar 30 kg de antracita para una carga mayor de seis toneladas. Para cargas menores de seis toneladas proyectar 20 kg de antracita, inyectando oxígeno al mismo tiempo y manteniendo la inyección con el fin de formar escoria espumosa.

Adicionar cal hasta completar 2200 kg teniendo en cuenta el cargue de cal que se hace al comienzo de la fusión, cargue 3ª cesta, fundir en TAP N° 1. Inyectar oxígeno para ayudar a la fusión de la chatarra, una vez los electrodos hayan penetrado en la chatarra se debe pasar a TAP N° 2.

Cargue 4ª cesta, fundir en TAP N° 1, inyectar oxígeno para acelerar la fusión, una vez los electrodos hayan penetrado en la chatarra se debe pasar a TAP N° 2. Antes de terminar la fusión de la chatarra proyectar 30 kg de antracita para una carga mayor de seis toneladas. Para cargas menores de seis toneladas proyectar 20 kg de antracita, inyectando oxígeno al mismo tiempo y manteniendo la inyección con el fin de formar escoria espumosa.

Cargue 5ª cesta, fundir en TAP N° 1. Inyectar oxígeno para ayudar a la fusión de la chatarra, una vez los electrodos hayan penetrado en la chatarra se debe pasar a TAP N° 2.

Cargue 6ª cesta, fundir en TAP N° 1, inyectar oxígeno para acelerar la fusión, una vez los electrodos hayan penetrado en la chatarra se debe pasar a TAP N° 2. Antes de terminar la fusión de la chatarra proyectar 30 kg de antracita para una carga mayor de seis toneladas. Para cargas menores de seis toneladas proyectar 20 kg de antracita, inyectando oxígeno al mismo tiempo y manteniendo la inyección con el fin de formar escoria espumosa.

NOTAS:

en caso de realizarse un séptimo cargue, proyectar 30 kg de antracita, para una carga mayor de seis toneladas. Para cargas menores de seis toneladas proyectar 20 kg de antracita, inyectando oxígeno al mismo tiempo y mantener la escoria espumosa hasta antes de tomar la primera muestra.

Cuando el número de cestas sean ocho NO PROYECTAR en la 7ª cesta. En la 8ª cesta, realizar las proyecciones anteriormente anotadas.

9. SEGUIMIENTO DEL PROCESO DE FUSIÓN CON FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA

Una vez se encontraron las condiciones más convenientes de operación (combinación C), que permitieron el menor consumo de energía, el siguiente paso consistió en realizar una serie de coladas con el fin de obtener datos para compararlos con los obtenidos en el seguimiento al proceso tradicional.

En la Tabla 13, se presentan los valores obtenidos para el consumo de energía en coladas producidas implementando el proceso de formación de escoria espumosa en el periodo de fusión.

Tabla 13. consumo de energía implementando la formación de escoria espumosa

Nº COLADA	FUSION (kWh)	CHATARRA (Tn)	PRODUCCION (Tn)
1	18334	40	34,38
2	20024	40	37,515
3	15978	40	37,038
4	19657	40	35,063
5	18487	40	37,515
6	17877	40	37,515
7	20027	40	37,515
8	19345	40	37,515
9	18381	40	37,515
10	18257	40	37,515

11	17666	40	37,515
12	18413	40	37,515
13	19576	40	37,515
14	17424	40	36,065
15	18734	40	37,5
16	17306	40	34,132
17	19883	40	37,357
18	16927	40	34,38
19	19829	40	37,515
20	17995	40	35,734
21	17470	40	37,038
22	19030	40	35,734
23	17555	40	30,012
24	17816	40	37,515
25	19154	40	37,515
26	17036	40	36,392
27	19881	40	36,392
28	17909	40	35,063
29	16171	40	36,392
30	19723	40	35,063
PROMEDIO	18339,54	40	1091,43

En la Tabla 14, se presentan los valores obtenidos para el consumo de energía respecto a la chatarra y acero en palanquilla producido en coladas implementando el proceso de formación de escoria espumosa en el periodo de fusión.

Tabla 14. Consumo de energía respecto a la chatarra y acero en palanquilla producido implementando la formación de escoria espumosa

N° COLADA	EF (kWh/TnCH)	EF (kWh/TnACP)
1	458,35	533,27516
2	500,6	533,759829
3	399,45	431,394784
4	491,425	560,619456
5	462,175	492,789551
6	446,925	476,529388
7	500,675	533,839797
8	483,625	515,660403
9	459,525	489,964014
10	456,425	486,65867
11	441,65	470,904971
12	460,325	490,817007
13	489,4	521,817939
14	435,6	483,127686
15	468,35	499,573333
16	432,65	507,031525
17	497,075	532,242953
18	423,175	492,350204
19	495,725	528,561909

20	449,875	503,582023
21	436,75	471,677736
22	475,75	532,546035
23	438,875	584,932694
24	445,4	474,903372
25	478,85	510,569106
26	425,9	468,124863
27	497,025	546,301385
28	447,725	510,766335
29	404,275	444,355902
30	493,075	562,501783
PROMEDIO	458.49	504.43

EF = CONSUMO ENERGIA FUSION

La Tabla 15, muestra los valores obtenidos para la variable tiempo de operación en coladas implementando el proceso de formación de escoria espumosa en el periodo de fusión.

Tabla 15. Tiempos de operación en etapas de fusión

Nº COLADA	TF(min)	DTF	TN
1	190	20	210
2	160	0	200
3	185	30	191
4	325	175	190

5	272	100	215
6	180	0	220
7	210	35	215
8	160	0	200
9	185	5	220
10	180	0	225
11	160	0	190
12	415	280	165
13	230	60	200
14	210	20	230
15	215	75	175
16	182	30	210
17	170	10	220
18	200	20	220
19	190	0	230
20	225	55	220
21	240	100	185
22	185	0	210
23	220	35	235
24	195	40	200
25	145	0	179
26	165	0	215
27	205	15	235
28	215	50	205
29	165	10	185
30	180	30	180
PROMEDIO	205,30	39,83	205,83

TF = TIEMPO FUSION

TN = TIEMPO NETO

DTF = DEMORAS TIEMPO DE FUSIÓN

8.1 REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA, TIEMPO E INSUMOS CON LA IMPLEMENTACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA

Consumo de energía

Promedios de consumo de energía durante las etapas de fusión:

Energía de fusión: 18339.54 kWh

Promedios de consumo de energía respecto al peso de chatarra cargada y al acero producido:

Energía de fusión: 458.49 kWh/Tn.Ch

504.43 kWh/Tn.Acp

Tiempo de operación

Promedios de tiempo de operación de fusión:

Tiempo de fusión (TF - DTF) = 205.30 – 39.83 = 165.47 min

Tabla 16 Consumo de insumos

	Kg/Tn chatarra	Kg/Tn acero producido
Antracita	3.47	1.00
Cal	59.24	19.66
Electrodos y Niples	4.11	4.56
Refractarios	2.53	2.81

9.1. Caracterización de Muestras de Escorias

En el transcurso del seguimiento al proceso tradicional, se tomaron muestras de escoria para comparar con muestras de escoria espumosa y determinar posteriormente si este último proceso influye en el rendimiento metálico. El rendimiento metálico se entiende como el metal (hierro) que es reducido a partir de la escoria y vuelve al baño.

La Tabla 17, muestra los resultados obtenidos de muestras de escorias implementando el proceso de formación de escoria espumosa terminada la fusión.

Tabla 17. Muestras de escorias terminada la fusión

Muestra (colada N°)	%SiO 2	%Ca O	%Al ₂ O ₃	%M gO	%Cr ₂ O ₃	%Mn O	%P ₂ O 5	%Fe O	%S	%Fe total	Bas.
1407	16.85	34.85	4.13	6.43	0.62	7.26	1.24	25.82	0.13	20.06	1.97
1412	18.73	35.46	4.37	5.60	0.69	6.45	1.15	26.24	0.20	20.39	1.78
1431	16.58	48.43	4.02	2.08	1.10	6.13	1.06	19.60	0.12	15.22	2.45
1508	11.50	54.18	2.83	1.87	1.24	4.35	1.15	21.80	0.18	16.38	3.91
1513	13.91	51.46	2.83	2.07	1.10	9.35	0.91	17.17	0.20	13.12	3.20
PROMEDI O	15.51	44.88	3.64	3.61	0.95	6.71	1.10	22.13	0.17	17.03	2.66

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

10.1. Comparación Cuantitativa de Resultados

Para el proyecto desarrollado se tomo como base las variables más importantes que influyen en los procesos de fabricación de acero, tales como:

Consumo de energía, tiempo de operación, presión de oxígeno, consumo de carburante (antracita), de cal, de electrodos y de masas refractarias.

Para un análisis comparativo de variables se realizo una selección previa de los datos obtenidos en las coladas realizadas tanto por el proceso tradicional como con formación de escoria espumosa.

10.1.1. Consumo de energía. A continuación se puede observar un cuadro comparativo de los resultados promedios obtenidos en dichos procesos, así como el ahorro logrado.

ENERGÍA	PROCESO TRADICIONAL	ESCORIA ESPUMOSA	AHORRO
FUSION (KWH/TNCH)	548.53	458.49	90.04 (16.4%)
FUSION (KWH/TACP)	604.25	504.43	99.82 (16.51%)

10.1.2. Tiempo de operación. Para la comparación de los tiempos de operación se efectuó un seguimiento a la duración de la fusión:

TIEMPO	PROCESO	ESCORIA	AHORRO
	TRADICIONAL	ESPUMOSA	
FUSION (Min)	166.8	165.47	1.33 (0.8%)

10.1.3. Consumo de antracita. A continuación se puede observar las tasas (índices) de consumo obtenidos por cada uno de los procesos:

ANTRACITA	PROCESO	ESCORIA	AUMENTO
	TRADICIONAL	ESPUMOSA	
(kg/TNCH)	3.05	3.47	0.42 (12.1%)
(kg/TACP)	3.4	3.81	0.41 (10.76%)

El aumento de antracita se debe a la necesidad de proyectarla durante casi la totalidad del proceso.

10.1.4. Consumo de cal. Las tasas (índices) de consumo se aumentaron durante la formación de escoria espumosa, debido a la adición constante durante el periodo de fusión.

CAL	PROCESO	ESCORIA	AUMENTO
	TRADICIONAL	ESPUMOSA	
(kg/TNCH)	53.8	59.24	5.44 (9.2%)
(kg/TACP)	60.12	65.02	4.9 (7.54%)

10.1.5. Consumo de electrodos. A continuación se observan se observan las tasas (índices) para los dos procesos mencionados.

ELECTRODOS Y NIPLES	PROCESO	ESCORIA	AHORRO
	TRADICIONAL	ESPUMOSA	
(kg/TNCH)	4.37	4.11	0.26 (5.9%)
(kg/TACP)	4.89	4.56	0.33 (6.7%)

10.1.6. Consumo de masas refractarias.

MASAS REFRACTARIAS	PROCESO	ESCORIA	AHORRO
	TRADICIONAL	ESPUMOSA	
(kg/TNCH)	2.93	2.53	0.4 (13.7%)
(kg/TACP)	3.28	2.81	0.47 (14.3%)

Las masas refractarias para la reparación del horno fueron de los materiales en el que más ahorro se obtuvo.

10.2. Estudio Economico

10.2.1. Costos unitarios.

	Tasa obtenida(kg/tn)	Costo Unitario (\$/kg)	Costo (\$/Tn)	Tonelada
Consumo de Energía	99.82.82	\$100.6/kwh	10041.9	
Consumo de Antracita	0.41	160	65.6	
Consumo de Cal	4.9	70	343	
Consumo de Electrodo	0.33	5780	1907.4	
Consumo de Masas Refractarias	0.47	1370	643.9	

La tasa (índice) obtenida (kg/tn), es la diferencia cuantitativa del proceso tradicional y el proceso con formación de escoria espumosa que se mostró en el capítulo 3, el costo unitario (\$/kg) es el valor que tiene estimado la empresa para adquirir tanto las materias primas como el material directo (energía). El costo por tonelada (\$/Tn) es el valor de la tasa obtenida por el costo unitario.

- Tasas (índices) que aumentaron.

ANTRACITA 0.41 kg/Tn.ACP

CAL 4.9 kg/Tn.ACP

- Tasas (índices) que disminuyeron.

ENERGIA 61.82 kwh/Tn.ACP

ELECTRODOS 0.33 kg/Tn.ACP

MASAS 0.47 kg/Tn.ACP

10.2.2. Costos totales. Para el análisis de costos de producción de acero mediante la formación de escoria espumosa proyectado para un año, tomando como base una capacidad teórica instalada de 50000 toneladas de acero producido, nos lleva a concluir los siguientes costos:

Costos que aumentaron:

ANTRACITA 0.41 kg/Tn.ACP X 160 \$/kg X 50.000TnACP = \$ 3.280.000

CAL 4.9 kg/Tn.ACP X 70 \$/kg X 50.000TnACP = \$17.150.000

TOTAL \$ 20.430.000

En tanto que la disminución de costos serían:

ENERGIA 99.82 kwh/Tn.ACP X 100.6 \$/kwh X 50.000 Tn.ACP = \$502.094.600

ELECTRODOS 0.33 kg/Tn.ACP X 5780 \$/kg X 50.000Tn.ACP = \$95.370.000

$$\text{MASAS REFRACTARIAS } 0.47 \text{ kg/Tn.ACP} \times 1370 \text{ \$/kg} \times 50.000\text{Tn.ACP} \\ = \$ 32.195.000$$

TOTAL \$ 629.659.600

10.2.3. Beneficio económico. Con la implementación del proceso de producción mediante formación de escoria espumosa se obtendría un beneficio económico de:

$$\$ 629.659.600 - \$ 20.430.000 = \$ 609.229.600$$

Este sería el beneficio económico referido a la capacidad teórica instalada de 50000 toneladas en un año, en los costos de producción.

Entonces el beneficio económico por tonelada de acero producido sería:

$$\frac{\$609.229.600}{50.000\text{Tn.Acp}} = 12.184,59\$/\text{Tn.Acp}$$

y en una colada de 40 toneladas el ahorro económico sería: \$ 487.383,6

11. CONCLUSIONES

La implementación del proceso de producción de acero con formación de escoria espumosa en el horno eléctrico de Acerías Paz del Río S.A, permite una notable disminución en los consumos de energía, electrodos y masas refractarias de reparación; variables que representan uno de los costos más elevados en la acería eléctrica. Los ahorros determinados en el desarrollo de este proyecto fueron un 16.4% de energía eléctrica, un 5.9% consumo de electrodos, y un 13.7% de masas refractarias.

Mediante la implementación del proceso de formación de escoria espumosa desde comienzos del periodo de fusión es posible acelerar y facilitar en cierta medida la operación, lográndose una disminución en el tiempo de fusión lo cual se ve reflejado en los ahorros de energía globales del proceso.

Los menores requerimientos de reparación con masas refractarias demostraron que la operación con escoria espumosa ayuda a que la radiación calórica y el ataque químico de la escoria sobre las paredes del horno disminuya considerablemente, protegiendo así el revestimiento del refractario.

La presencia de escoria espumosa durante la fusión disminuye el desgaste de las puntas de los electrodos ya que este se produce fundamentalmente por la oxidación de los mismos con el oxígeno inyectado.

Los resultados mostraron que la combinación de cantidad de antracita, presión de oxígeno y carga de cal que produce los mejores resultados en la operación con escoria espumosa corresponden a 20 kg, 5 bares y 2200 kg respectivamente. La implementación del proceso con formación de escoria espumosa permite disminuir los riesgos para los operarios, el desgaste físico, y el ruido asociado a estas operaciones.

12. RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar un carburante de características granulométricas y químicas similares al empleado en este proyecto para asegurar un buen funcionamiento de la máquina inyectora.

Para el manejo y buen funcionamiento de la máquina inyectora es recomendable tener en cuenta los manuales de operación y mantenimiento establecidos en el desarrollo de este trabajo.

Es recomendable que la inyección de antracita y oxígeno se realice en la interfase baño metálico - escoria para así obtener un buen grado de espumación.

La presión de oxígeno así como su flujo, deben ser controlados en forma estricta, por lo cual es recomendable adecuar la instalación con los aparatos de medida correspondientes.

BIBLIOGRAFIA

- GAONA GONZALEZ, Henry. Mejoramiento del proceso de producción de acero en un horno eléctrico de arco mediante la formación de escoria espumosa. Tunja, 1998. Tesis de grado. Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia. Facultad de ingeniería.
- JAUREGUI EPALZA, Juan José. Modo Operatorio de Fabricación de acero en el Horno Eléctrico básico. Acerías Paz del Río S.A.
- BODSWORTH Y BELL. Physical chemistry of iron and steel manufacture, Longman Group, 1972, 569 p.
- WUNSCH Y SIMCOE. Electric arc furnace steelmaking with quasi – submerged. 1984, 35 p.
- THORNTON. foaming slags – carbon injection, 1984, 2 p.
- ROLDAN M, Miguel Antonio. Diseño y construcción de una máquina proyectadora automatizada para la formación de escoria espumosa en el horno eléctrico de Acerías Paz del Río S.A. Sogamoso 2003, Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia.
- ACERIA. Estados de responsabilidad.
- HIROSHI S, Sawabe. Principios fundamentales del Horno eléctrico.

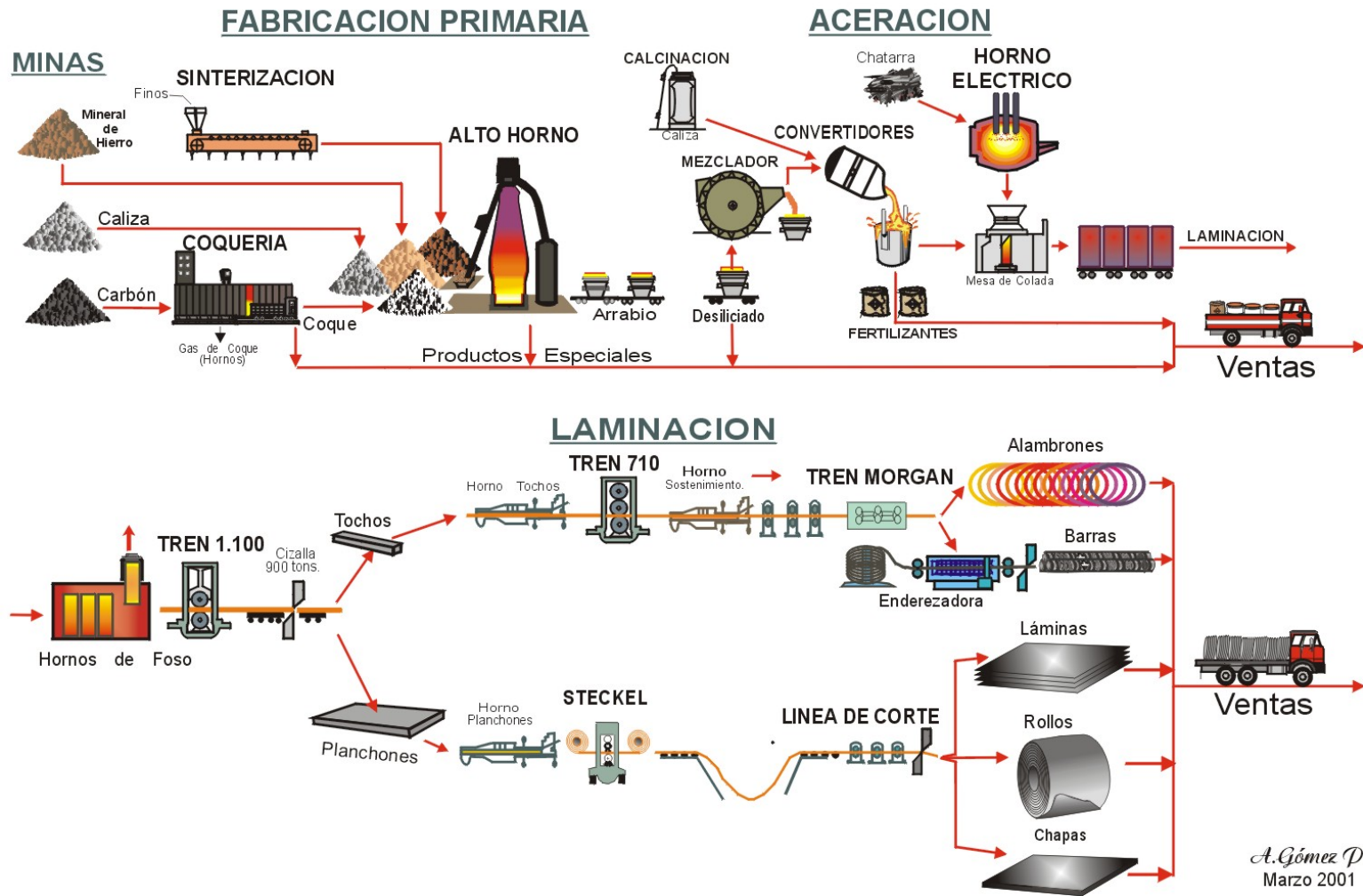
- El horno eléctrico, Acerías Paz del Río, S.A.
- PERRY H, Robert. Manual del ingeniero químico. Quinta edición. Volúmenes I, México. 1983. Mc Graw – Hill. 2139 p.
- IHOBÉ, S.A. Sociedad pública de gestión ambiental. Libro Blanco para la minimización de residuos y emisiones, escorias de acerías. Comunidad autónoma del país Vasco, 1997. Disponible en internet: <http://www.ihobe.net>.
- MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y análisis de experimentos. México 2004. Universidad estatal de Arizona. Editorial LIMUSA, S.A. Segunda Edición.
- WILEY, John. Linear Models S. Rsearle Ed. Toronto Canadá.
- ICONTEC. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación NTC 1486. Bogotá, 2002.
- ICONTEC. Citas y notas de pie de página NTC 1487. Bogotá, 2002.
- ICONTEC. Numeración de divisiones y subdivisiones en documentos escritos NTC 1075. Bogotá, 2002.
- ICONTEC. Referencia bibliográfica para tesis y otros trabajos de grado NTC 1160. Bogotá, 2002.

ANEXOS

ANEXO A DIAGRAMA DE FLUJO DE LA ACERIA PAZ DEL RIO



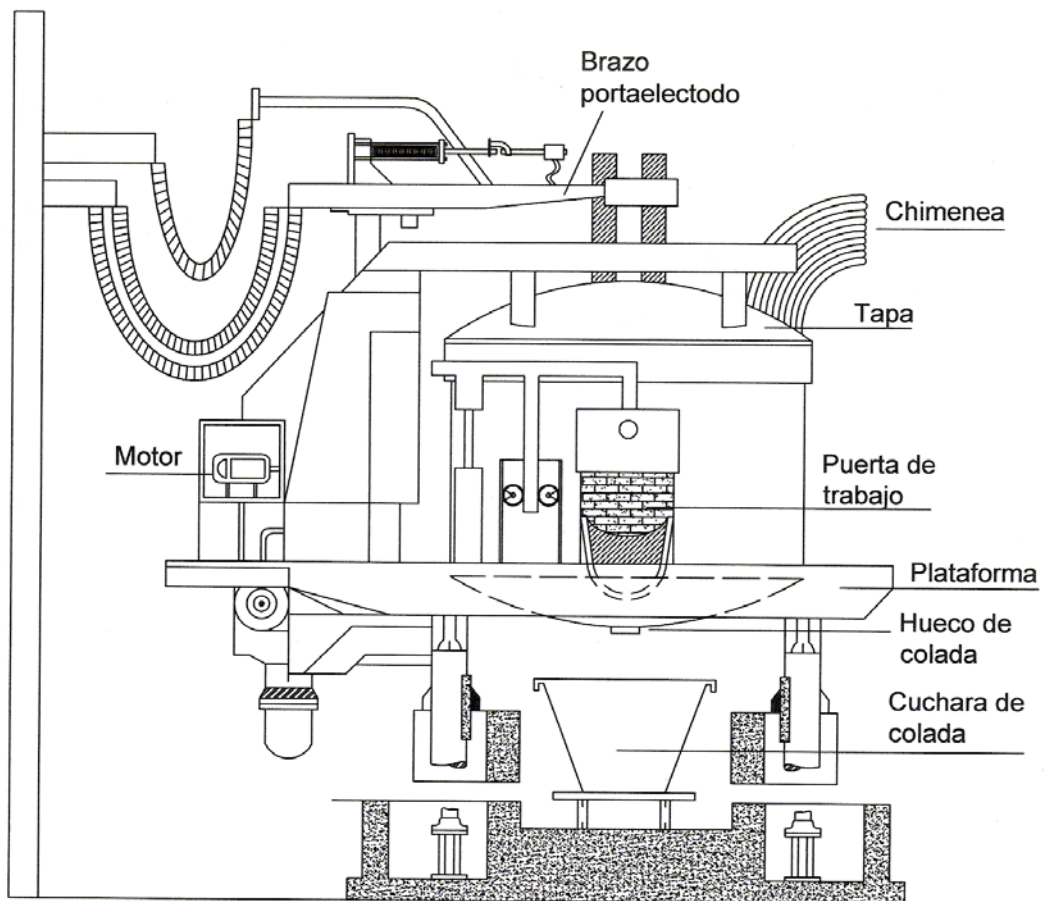
DIAGRAMA DE FLUJO



A. Gómez P.
Marzo 2001

ANEXO B VISTA FRONTAL DEL HORNO DE ACERIAS PAZ DEL RIO

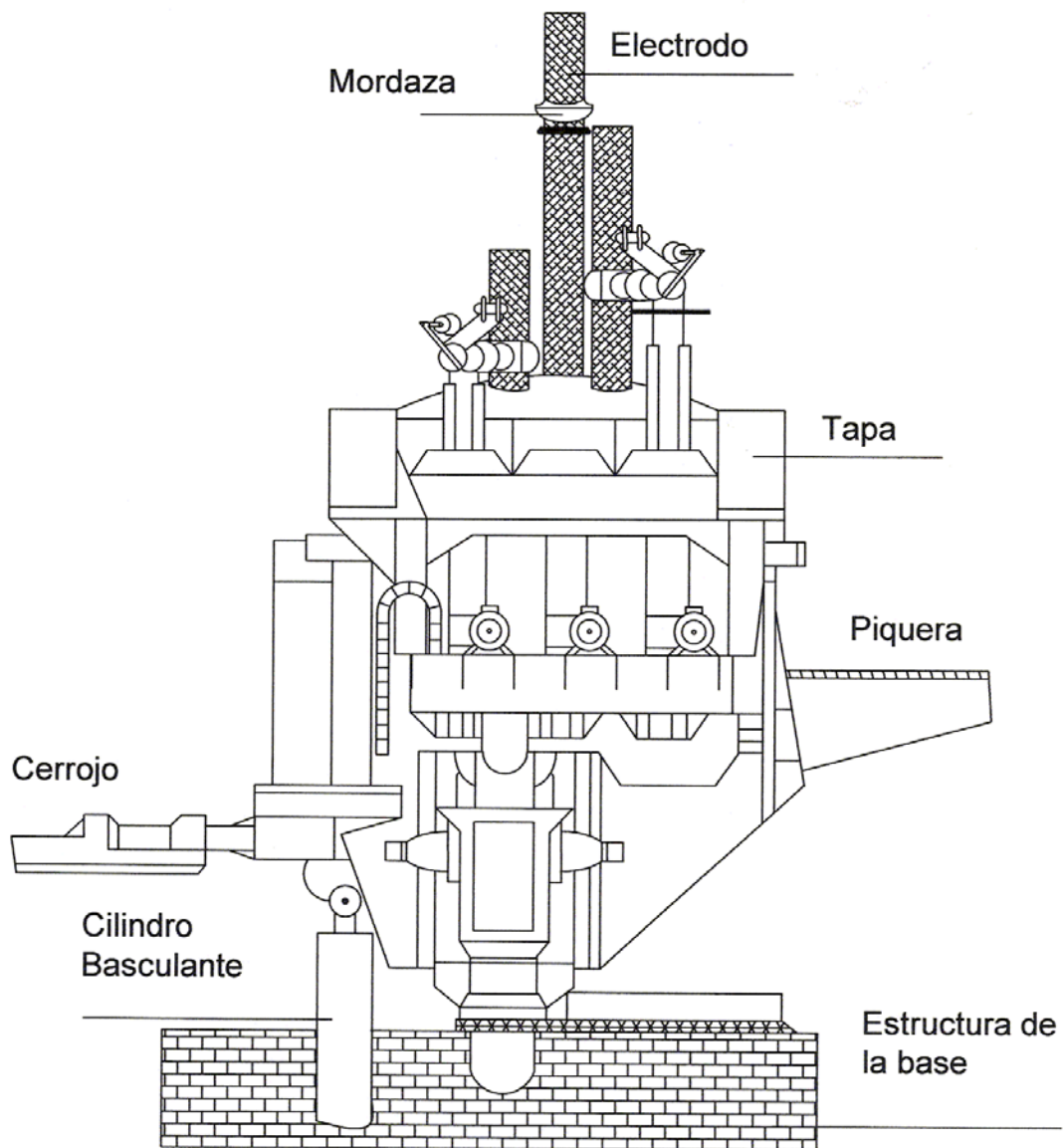
HORNO ELECTRICO DE ARCO
ACERIAS PAZ DEL RIO S.A.



VISTA FRONTAL

ANEXO C VISTA LATERAL DEL HORNO DE ACERIAS PAZ DEL RIO

HORNO ELECTRICO DE ARCO
ACERIAS PAZ DEL RIO S.A.



VISTA LATERAL