

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS MEJORES CONDICIONES
DE OPERACIÓN DEL CONVERTIDOR L.W.S. A PARTIR DE LAS
CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL ARRABIO PRODUCIDO EN
ACERÍAS PAZ DEL RÍO S.A.**

**YHAMANY ENRIQUE ANAYA LEGUIZAMON
DAVID ERNESTO CASTELLANOS BARAJAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2004

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS MEJORES CONDICIONES
DE OPERACIÓN DEL CONVERTIDOR L.W.S. A PARTIR DE LAS
CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL ARRABIO PRODUCIDO EN
ACERÍAS PAZ DEL RÍO S.A.**

**Trabajo de grado para optar título de
Ingeniero Químico**

**YHAMANY ENRIQUE ANAYA LEGUIZAMON
DAVID ERNESTO CASTELLANOS BARAJAS**

DIRECTORES

**DIONISIO ANTONIO LAVERDE
Docente Titular**

DIRECTOR

**JAVIER GONZALO CARVAJAL PINZON
INGENIERO METALÚRGICO
ACERÍAS PAZ DEL RÍO S.A.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2004

Dedicatoria

*A mi Diosito y a mi Virgencita Santísima,
por darme lo mejor que tengo MI FAMILIA
(Mi taita, mi mamita, Leo, Alexa, Judith y Paula),
solo ellos saben el eterno amor que por todos ellos siento,
por lo cual sobran las palabras cuando hablan los hechos.*

*Cada mañana aparece un horizonte
que vislumbra mi camino,
Diana, tú abres mi ventana,
aclaras mi penumbra,
levantas mi cara y me haces adicto a tu amor*

DAVID ERNESTO

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a todo el personal de la acería en especial al ingeniero Javier Carvajal Pinzón por su infinita colaboración, a Mauricio Morantes por su apoyo, además a nuestro director en la UIS el ingeniero Diomnicio Antonio Laverde por su gran colaboración para llevar a feliz termino este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1. GENERALIDADES	4
1.1. HISTORIA ACERIAS PAZ DEL RIO S.A.	4
1.1.1. Historia de la empresa.	4
1.1.2. Localización.	5
1.2. PROCESO SIDERÚRGICO	5
1.2.1. Fabricación primaria.	6
1.2.1.2. Coquería y subproductos	8
1.2.1.3. Sinterización.	8
1.2.1.4. Alto horno.	9
1.2.2. Aceración.	11
1.2.3. Proceso de laminación	11
2. PROCESO L.W.S.: ACERÍA AL OXIGENO	12
2.1. PROCESO DE REFINACIÓN.	12
2.2. ETAPAS DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA L.W.S.	15
2.3. DESCRIPCIÓN DEL CONVERTIDOR L.W.S.	16
2.3.1. Cuerpo.	16
2.3.2. Cinturón.	17
2.3.3. Fondo.	17
2.3.4. Revestimiento refractario.	17
2.4. TERMODINÁMICA DEL PROCESO DE AFINO	18

	Pág.
2.4.1. Convertidores básicos al oxígeno.	18
2.4.1.1 Termodinámica básica.	19
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	21
3.1. ASPECTOS METODOLÓGICOS	22
3.2. RECONOCIMIENTO DEL PROCESO L.W.S.	22
3.3. DESARROLLO DE LA PRIMERA FASE EXPERIMENTAL	23
3.3.1. Mecanismo de muestreo	24
3.3.2. Muestreo de la composición química del arrabio.	25
3.3.3. Composición química del acero en bruto durante la inyección de oxígeno.	25
3.3.4. Muestreo de la concentración del oxígeno disuelto.	27
3.4. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA	29
3.5. MUESTREO DE CAL EN ROCA, POLVO Y BARRERA	30
3.5.1. Cal en polvo Maerz.	30
3.5.2. Cal en roca Maerz para la barrera.	31
3.5.3. Cal en roca Priest para el soplo.	31
3.6. CHATARRA	32
3.7. MUESTREO DE ESCORIAS	34
3.8. OXÍGENO REQUERIDO	35
3.8.1. Balances de materia.	35
3.9 SENGUNDA FASE EXPERIMENTAL O FASE FINAL	38
3.9.1. Planteamiento de la operación del convertidor L.W.S.	39
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	41
4.1. PRIMERA FASE EXPERIMENTAL	41
4.1.1. Chatarra.	41
4.1.2. Muestreo de cal.	42

	Pág.
4.1.3. Muestreo de escorias.	44
4.1.4. Concentración del oxígeno disuelto	45
4.1.5. Inyección de oxígeno en operación normal.	46
4.2. SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL	51
4.2.1. Resultados de la experimentación final.	53
4.3. ANALISIS ECONOMICO	58
5. CONCLUSIONES	61
6. RECOMENDACIONES	62
BIBLIOGRAFÍA	63
ANEXOS	65

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo de Acerías Paz del Río S.A.	6
Figura 2. Figura 2. Diagrama de flujo proceso de aceración.	11
Figura 3. Diagrama del convertidor y una tobera.	17
Figura 4. Puntos de muestreo durante el soplo	24
Figura 5. Toma muestra para arrabio líquido	25
Figura 6. Toma muestra de afino	26
Figura 7. Toma muestra Espermix	27
Figura 8. Equipo Multilab III	28
Figura 9. Termopar de inmersión.	29
Figura 10. Muestras de cal: a. Dosificador de cal en polvo (Dp), muestra. b. Cesta de cal de la barrera, muestra. c. canasta de cargue de cal en roca para el soplo, muestra.	32
Figura 11. a. Canasta para el cargue de la chatarra. b. Reporte de peso chatarra. c. Chatarra cargada al convertidor.	33
Figura 12. Analizador de escoria de fuente radioactiva.	34
Figura 13. Estadística de arrabio a la salida del mezclador, primer semestre 2004.	39
Figura 14. Probabilidad de ocurrencia de la reactividad de la cal en roca para el soplo cargada al convertidor.	42
Figura 15. Probabilidad de ocurrencia de la reactividad de la cal Priest en roca para el soplo cargada al convertidor.	43

Figura 16. Comportamiento porcentual promedio de los elementos químicos durante la inyección de oxígeno a arrabios tipo 1.	47
Figura 17. Comportamiento porcentual promedio de los elementos químicos durante la inyección de oxígeno a arrabios tipo 2.	49
Figura 18. Comportamiento porcentual de los elementos durante la inyección de oxígeno al arrabio tipo 3.	50

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Calidades de arrabio A.P.R.	23
Tabla 2. Seguimiento al peso de la cal de la barrera	31
Tabla 3. Porcentajes promedio de la composición química de la chatarra cargada al convertidor L.W.S.	33
Tabla 4. Hoja de cálculo del balance de materia realizado para cada colada.	38
Tabla 5. Composición química promedio de un arrabio bajo en silicio.	40
Tabla 6. Composición química promedio de un arrabio alto en silicio	40
Tabla 7. Reporte del peso cargado para cada una de las coladas muestreadas.	41
Tabla 8. Inyección de cal en polvo	44
Tabla 9. Reporte de %FeO en la escoria L.W.S	44
Tabla 10. Resultados de la concentración de Oxígeno	45
Tabla 11. Operación normal de operación convertidor L.W.S.	46
Tabla 12. Oxígeno calculado con balances de materia Vs oxígeno real inyectado.	46
Tabla 13. Mejores condiciones de operación para arrabios bajos en silicio.	51
Tabla 14. Mejores condiciones de operación de arrabios altos en silicio.	52
Tabla 15. Planteamiento de la operación teórica para cada una de las coladas a muestrear	53
Tabla 16. Planteamiento de la inyección de cal en polvo teórica para cada una de las coladas a muestrear	54
Tabla 17. Coladas descartadas por el estudio.	55
Tabla 18. Operación real cada una de las coladas a muestreadas	55

Pág.

Tabla 19. Operación real de la Inyección de la cal en polvo para cada una de las coladas a muestreadas	56
Tabla 20. Resultados de contenido de FeO	57
Tabla 21. Composición Química, temperatura y ppm de O ₂ para el acero en bruto.	57
Tabla 22. Inversión	59
Tabla 23. Beneficio	59

LISTA DE ANEXOS

- Anexo A. Derivación termodinámica del diagrama.
- Anexo B. De oxígeno disuelto en el baño.
- Anexo C. Marchas Químicas.
- Anexo D. Análisis químicos.

RESUMEN

TÍTULO: DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS MEJORES CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL CONVERTIDOR L.W.S. A PARTIR DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL ARRABIO PRODUCIDO EN ACERÍAS PAZ DEL RÍO S. A. *

AUTORES: DAVID ERNESTO CASTELLANOS BARAJAS, y, YHAMANY ENRIQUE ANAYA LEGUIZAMON **

PALABRAS CLAVES: Acería Paz del Río, arrabio, convertidor L.W.S., proceso de refinación de acero.

DESCRIPCIÓN:

En Acerías paz del Río, luego de la reducción del mineral de hierro en el alto horno se obtiene una fundición de hierro con alto contenido de impurezas (arrabio), para eliminarlas se utiliza el proceso de refinación de acero vía convertidor L.W.S. La composición química y la temperatura de los arrabios causan problemas de estabilidad en los parámetros de control como los son: % de FeO en la escoria, temperatura y oxígeno disuelto.

El presente trabajo, resuelve este problema experimentalmente para los arrabios con contenido en silicio por debajo de 1%, se inicia con un reconocimiento del proceso en condiciones reales, luego se presenta una primera fase experimental en la cual se contemplan todas las variables involucradas en el proceso, en seguida, los resultados obtenidos son analizados siendo la base para el planteamiento de las mejoras a la operación del convertidor, hipótesis que se comprueban con datos reales en una segunda fase de experimentación.

El valioso aporte de este proyecto es el de asegurar que se estandariza el proceso de refinación a partir de las condiciones físico-químicas del arrabio, además se establecen los perfiles de soplo de oxígeno del proceso L.W.S. para arrabio con contenidos en silicio por debajo del 1% y muestra la rentabilidad del proyecto a través del análisis económico, teniendo en cuenta la implementación del proyecto.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director UIS Ing. Dionisio Antonio Laverde, Director A.P.R. Ing. Javier Carvajal Pinzón

ABSTRACT

TITLE: EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE BEST CONDITIONS IN OPERATION OF THE L.W.S. CONVERTOR STARTING FROM THE PHYSIOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE PIG-IRON TAKEN PLACE IN ACERÍAS PAZ DEL RÍO S. A. *

AUTHORS: DAVID ERNESTO CASTELLANOS BARAJAS, and, YHAMANY ENRIQUE ANAYA LEGUIZAMON **

KEY WORDS: Acería Paz del Río, pig-iron, L.W.S. convertor, process of steel refinement.

DESCRIPTION:

In Acerías Paz del Río, after the reduction of the iron mineral in the high oven an iron foundry is obtained with high content of sludges (pig-iron), to eliminate them the process of steel refinement it is used via L.W.S. convertor. The chemical composition and the temperature of the pig-irons cause problems of stability in the control parameters like they are they: % of FeO in the scum, temperature and oxygenate dissolved.

The present work, solves this problem experimentally for the pig-irons with content in silicon below 1%, it begins with a recognition of the process under real conditions, then a first experimental phase is presented in which all the variables are contemplated involved in the process, soon after, the obtained results are analyzed being the base for the position from the improvements to the operation of the convertor, hypothesis that are proven with real data in a second experimentation phase.

The valuable contribution of this project is the of assuring that the refinement process is standardized starting from the physical-chemical conditions of the pig-iron, the profiles of blow of oxygen of the L.W.S. process also settle down for pig-iron with contents in silicon below 1% and it shows the profitability of the project through the economic analysis, keeping in mind the implementation of the project.

* Work of Grade.

** Faculty of Engineerings Physique Chemical. School of Chemical Engineering. Directing UIS Ing. Dionisio Antonio Laverde, Directing A.P.R. Ing. Javier Carvajal Pinzón

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el aumento de las exigencias en el cumplimiento de los estándares internacionales sobre la composición química y calidad de los aceros ha llevado a las empresas siderúrgicas a realizar diversos estudios de la operación normal de todos sus procesos de manufactura. En Colombia, la empresa Acerías Paz del Río S.A., como integrante de este sector, se ha involucrado con estos cambios. Es aquí donde la universidad, como miembro de la sociedad, generadora de investigación, apoya a las empresas en la mejora de sus procesos, dentro del compromiso ineludible de éstas con el desarrollo económico y social del país.

Actualmente, la empresa Acerías Paz del Río S.A. está nuevamente a la cabeza de las mejores industrias del país, comprometida con la calidad y la competitividad de sus procesos de obtención de acero. Es por esto que al interior de la compañía se reconoce la necesidad de los cambios en sus procesos como estrategia útil para continuar posicionándose en el mercado.

En las siderurgias integradas, la composición del acero es determinada en la planta de aceración puesto que allí se realiza la refinación del acero. En el caso de acerías Paz del Río S.A. esta división cuenta con los convertidores L.W.S. El presente trabajo de investigación se centra en mejorar la operación del convertidor a partir del seguimiento experimental de las variables involucradas en el proceso, teniendo en cuenta que desde la implementación de éste, en la planta de aceración, no se ha realizado un estudio acerca de la operación normal del mismo con las condiciones que presenta el arrabio fosforoso de acerías Paz del Río.

Como primera medida se realizó una inducción en planta al proceso de refinación de acero vía convertidor L.W.S., con el fin de establecer una metodología y las variables de la investigación. Una vez realizado este procedimiento se estudió la implicación de cada una de las variables en la operación normal, luego se propuso un modo de operación estándar para la composición química del arrabio con el que se opera haciendo seguimientos periódicos, determinando su comportamiento químico, disminuyendo el oxígeno utilizado, y mejorando el cumplimiento de los parámetros de control del convertidor* estipulados por la empresa.

* Parámetros de control del convertidor L.W.S. Contenido en porcentaje en peso de óxido de hierro (%FeO) en la escoria y contenido de oxígeno disuelto en acero (ppm O₂) al término de la operación.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La planta de aceración de Acerías Paz del Río S.A, utiliza el convertidor L.W.S. como su proceso de refinación de acero, el cual trabaja con arrabios fosforosos como materia prima producidos por el alto horno. Estos arrabios presentan gran variabilidad en composición química debido, principalmente, a las características de los elementos cargados al proceso.

La competitividad a nivel nacional del mercado del acero obliga a un aumento en las exigencias de calidad y producción. La planta de aceración consiente de este reto busca mejorar continuamente su proceso, por lo que requiere la estandarización del proceso L.W.S. a partir de las características físico-químicas del arrabio (el cual representa el 70 % del total de la carga metálica) puesto que desde su instalación ha operado de manera indiferente a esta variable (composición química del arrabio cargado al convertidor) ocasionando grandes distorsiones en los parámetros de control y en los requerimientos de oxígeno colada a colada.

1. GENERALIDADES

1.3. HISTORIA ACERIAS PAZ DEL RIO S.A.

1.3.1. Historia de la empresa.

La empresa Acerías Paz del Río S.A. nace como consecuencia de la escasez de acero para consumo nacional y del crecimiento dinámico en diferentes frentes económicos del país como: la industria metalmecánica, la construcción, la minería, entre otros. Luego de estudios geológicos adelantados por el Instituto de Fomento Industrial Colombiano (IFI), se estableció la propuesta de instalar una siderúrgica de gran tamaño que supliera la demanda nacional de acero.

Teniendo en cuenta la cercanía a ricos yacimientos de mineral de hierro, carbón, piedra caliza y proximidad a la Laguna de Tota como fuente hídrica, fue seleccionada como lugar propicio para la construcción la hacienda Belencito. Esta hacienda se halla cercana a los municipios de Nobsa, Duitama y Sogamoso. Para la instalación de la empresa el gobierno nacional expidió la ley 45 de 1947 que dio vía libre a la construcción de la empresa siderúrgica semioficial “Acerías Paz del Río”. Desde su diseño se pensó en una siderúrgica integral vía alto horno. Una vez constatada la existencia de carbones bituminosos coquizables, se seleccionó como método de refinación de acero los convertidores **THOMAS**, por su capacidad de refinación de arrabios provenientes de mineral de hierro con alto contenido en fósforo.

El 13 de octubre de 1954 nace Acerías Paz del Río S.A., la primera y -hasta hoy- la única industria siderúrgica integrada del país. Ese día se obtuvo la

primera colada del convertidor **THOMAS** de 10 lingotes y 900 kg cada uno, marcando el inicio de la siderurgia en Colombia.

Hoy en día la industria siderúrgica atraviesa un periodo de crecimiento acelerado, propiciado por la demanda internacional del acero. Este hecho ha envuelto a la siderúrgica Paz del Río S.A. en un proceso de reconversión industrial para ser frente al mercado globalizado, convirtiéndola así en una organización más eficiente en producción y comercialización de productos y servicios.

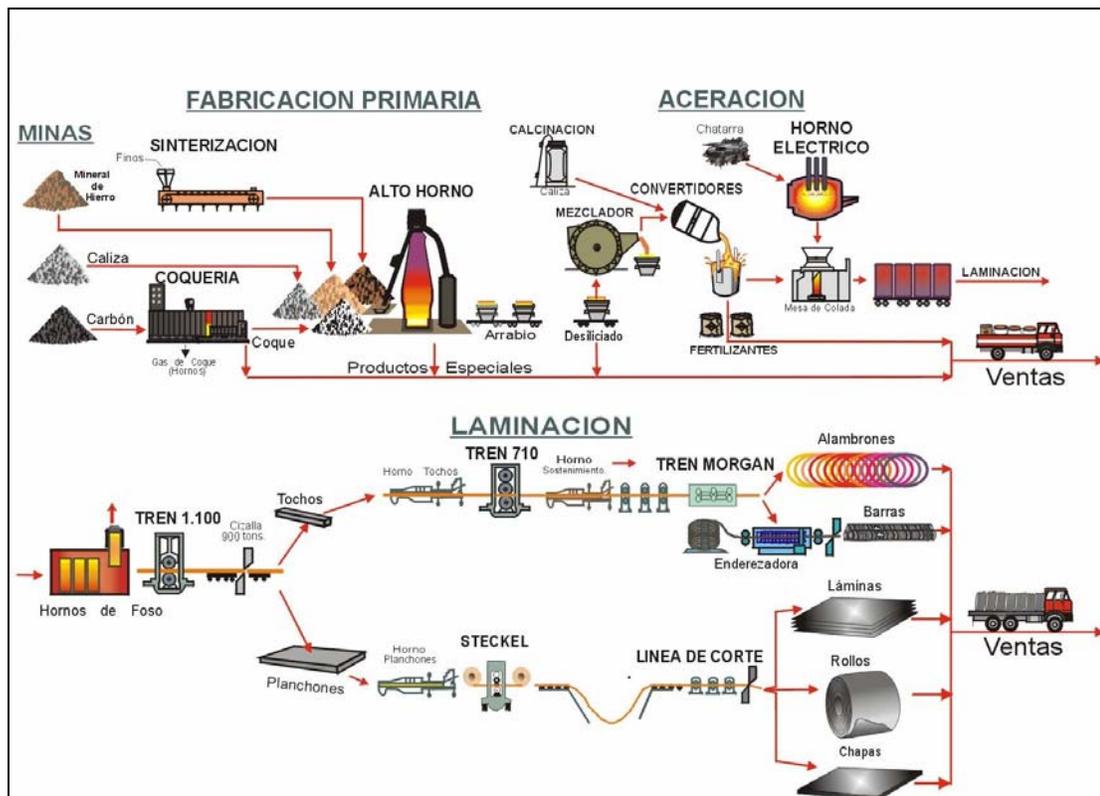
1.3.2. **Localización.**

La zona industrial está ubicada en Belencito dentro de la jurisdicción de los municipios de Nobsa, Corrales y Tópaga, a seis kilómetros de Sogamoso, treinta y seis kilómetros vía férrea del municipio de Paz del Río, cien kilómetros de Samacá y a doscientos diez kilómetros de Santa Fe de Bogotá; a una altura de 2570 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura media de dieciocho grados centígrados (18°C). En estos momentos es la siderúrgica integrada que posee la ubicación más cercana a sus materias primas en el mundo. Sin embargo, aunque su localización en el centro del país, le ha proporcionando liderazgo en el mercado nacional, ha sido desventajosa para el intercambio internacional por los elevados costos del transporte de los productos terminados a puerto. Administrativamente la empresa se distribuye en cuatro frentes industriales: Belencito, Paz del Río, Samacá y Santa Fe de Bogotá.

1.4. PROCESO SIDERÚRGICO

El proceso de elaboración de acero terminado en Acerías Paz del Río S.A. consta de tres etapas: fabricación primaria, aceración y proceso de laminación (figura 1).

Figura 1. Diagrama de flujo de Acerías Paz del Río S.A.



Fuente. Centro de documentación Acerías Paz del Río S.A.

1.4.1. Fabricación primaria.

➤ **Extracción.** El área mineralógica de la empresa está extendida en la jurisdicción de los municipios de Nobsa, Corrales, Tópaga, Paz del Río, Samacá, Tasco y Socha. Los minerales explotados en la empresa son el mineral de hierro, el carbón y la caliza.

➤ **Mineral de hierro.** Este mineral es catalogado como un material de uso tecnológico, se puede distinguir entre los denominados estructurales y también cumple funciones específicas basadas en sus propiedades magnéticas, ópticas y catalíticas. Se extrae de las minas el Uvo, Uche en Tasco y el Banco en el municipio de Paz del Río. En los patios del afloramiento minero, se tritura y se seleccionan dos fracciones, los finos para sinterización y el material grueso para el alto horno, luego se transporta vía férrea a la planta siderúrgica.

➤ **Carbón.** Los carbones que se consumen proceden en un 80% de la región de Paz del Río y un 20% de la región de Samacá y Cundinamarca. La empresa actualmente explota parte del carbón alto volátil en las minas de Chapa, Esperanza, Sativanorte y Sochaviejo, el carbón medio volátil de las minas de los Laureles y Samacá y completa sus necesidades con compras a acopios de carbón de la región.

➤ **Caliza.** Las características químico mineralógicas y estructurales de este tipo de sedimento lo hacen de gran utilidad en los procesos siderúrgicos. De la pureza y estructura depende su aptitud para ser utilizada en la fabricación de cal siderúrgica.

Los yacimientos de caliza que explota Acerías Paz del Río S.A, están situados en las propias inmediaciones de Belencito. Se trata de un yacimiento sedimentario marino del Cretáceo inferior, que se extiende ininterrumpidamente a lo largo de una faja de 10 Km de longitud, desde el Sur de Nobsa hasta el norte de Corrales. Entre las principales impurezas contenidas en la caliza podemos citar las siguientes:

- ❖ Dióxido de azufre (SiO_2), presente como cuarzo, arcilla, feldespato, etc.
- ❖ Alúmina (Al_2O_3), presente como arcilla, feldespato, etc.

- ❖ Azufre (S), como pirita, yeso, anhidrita.
- ❖ Oxido de magnesio (MgO), que en la mayoría de los casos no es considerado como impureza nociva.

Siderúrgicamente el carbonato se transforma a un oxido de calcio cuando se somete la piedra caliza a una temperatura cercana a los 900 °C, produciéndose la reacción:



El producto de la reacción es de gran importancia para el proceso de refinación del arrabio vía convertidor, donde el CaO actúa como aglomerante de óxidos en el baño metálico.

1.2.1.2. Coquería y subproductos. La planta produce coque metalúrgico como resultado de la destilación del carbón bituminoso en ausencia de aire. El coque es destinado para los procesos en el alto horno, fundición, sinterización y aceración.

El proceso se realiza en una batería de cincuenta y siete hornos de cámara de combustión vertical tipo cañón **Koppers - Becker** (Inglaterra), en los cuales se deposita de 14 a 16 toneladas de carbón, sometidos a una temperatura de 1200 °C. Durante el proceso se separan las materias volátiles de las cuales se obtienen subproductos especiales como el gas de alquitrán de hulla, sulfatos de amonio, brea, ácido sulfúrico y naftas.

1.2.1.3. Sinterización. La planta recibe los materiales finos producidos en los diferentes procesos de trituración, molienda, homogenización y transporte de todas las materias primas, además coquecillo y cascarilla de laminación.

El proceso de sinterización consiste en someter a fusión incipiente las paredes de los diferentes materiales que conforman una mezcla homogénea y perfectamente balanceada, compuesta por finos de mineral de hierro, finos de caliza, laminilla, cal, coquecillo y finos de retorno. Durante el proceso la carga es sometida a una semifusión altamente oxidante, en donde se alcanzan temperaturas del orden de 1350 ° C.

El producto final es denominado sinter y se caracteriza por su apariencia metálica, alta resistencia a la ruptura, color gris oscuro, alta porosidad interna, composición química homogénea, ausencia de humedad y materiales volátiles. Este producto luego es triturado, cribado y enviado con una determinada granulometría al alto horno.

1.2.1.4. Alto horno. El alto horno conocido con el nombre de Elena fue construido de acuerdo con la ingeniería y planos de la firma Arthur Mckee & Co. De Cleveland, Ohio. Su montaje se inició en 1952.

El alto horno es el corazón de la siderúrgica, ya que le impone el ritmo de producción, tanto a las plantas que le suministran materias primas, como a las que transforman el arrabio hasta llegar a los productos finales (Acería y laminación). Básicamente, es un reactor químico y a su vez un intercambiador de calor que funciona de forma continua. Los materiales fríos y oxidados se calientan y se reducen al entrar en contacto con una corriente gaseosa ascendente.

Las materias primas se cargan al alto horno por la parte superior, mediante dos vagonetas que son llenadas en la parte inferior de la estructura del horno por el carro-báscula. En esa zona hay dos tolvas, una pequeña ubicada encima de una grande y ambas selladas con una campana en la parte inferior.

Las vagonetas de carga alimentan la tolva pequeña. Cuando la campana pequeña desciende, su carga cae en la tolva grande en donde se pueden acumular hasta seis cargas. Para entregar su contenido al interior del horno la campana grande baja, la campana pequeña se cierra antes de la apertura de la grande, para evitar que el gas del horno escape a la atmósfera, la tolva grande se carga primero con coque y luego con el resto de las materias primas, de tal manera que con dos aperturas sucesivas de la campana grande, se obtiene una carga completa del horno balanceada térmica y químicamente.

La carga, al descender, se va calentando por intercambio de calor con los gases ascendentes producto de la combustión del coque, a nivel de las toberas, con el aire de soplo que ha sido precalentado en las estufas a una temperatura entre 700 y 850°C. Este precalentamiento permite eliminar el agua y eleva la temperatura de la carga. Posteriormente se reduce el contenido de oxígeno al mineral de hierro, que inicialmente estaba oxidado pasando gradualmente a hierro puro. Esta fase se conoce como “reducción”.

Por efecto de las altas temperaturas (1500 °C), la mayor parte de la carga pasa al estado líquido, proceso conocido como “fusión” y el resto a estado gaseoso. La carga se mezcla con el carbono del coque (carburación), obteniéndose un producto metálico llamado arrabio (3.5% de carbono) y una parte no metálica llamada escoria, utilizada como materia prima para producción de cemento. El gas de alto horno resultante está compuesto por N, CO, CO₂, H₂ y O₂.

A medida que su temperatura aumenta, la carga experimenta una serie de reacciones químicas y cambios físicos, lo que permite llegar en estado líquido al crisol, en donde la escoria flota sobre el metal fundido. Esta escoria

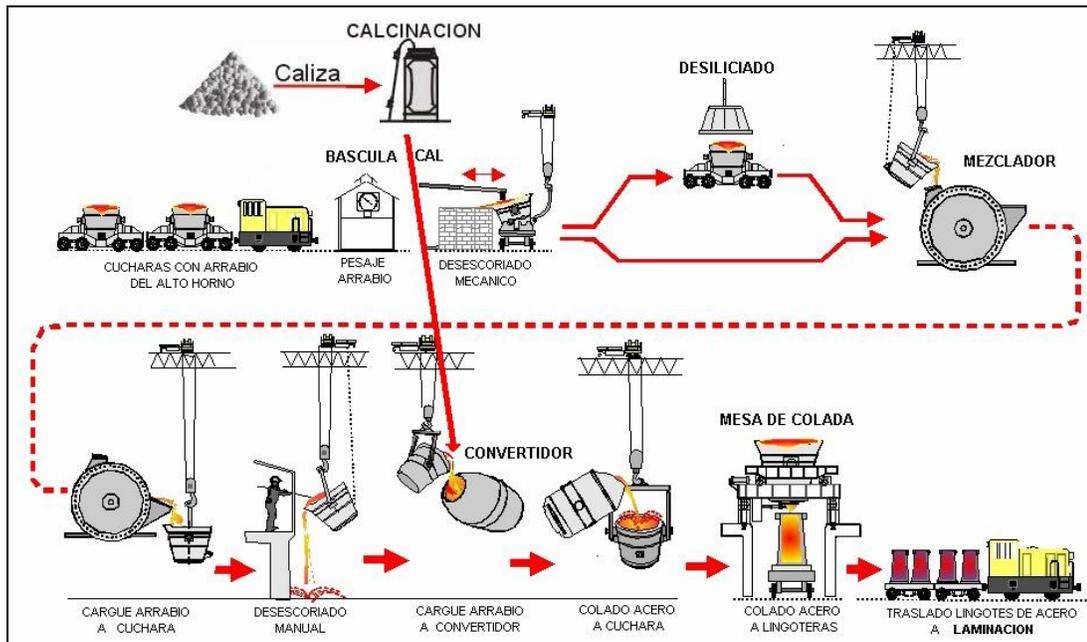
es retirada cada dos horas. El arrabio se evacua en siete coladas por día, y su producción promedio es de 925 t /día, con una composición muy variable entre coladas.

1.2.2 Aceración.

➤ **Acería.** Está conformada por las plantas de calcinación, recuperación metálica, desiliciado, convertidores L.W.S, colada, fundición, refractarios y horno eléctrico. La operación de fabricación de acero se realiza en conjunto para tratar adecuadamente el arrabio proveniente del alto horno para su posterior refinación. El arrabio es refinado en presencia de oxígeno a través de reactores químicos denominados convertidores L.W.S. para luego ser colado sobre lingoteras en donde permanece 50-70 minutos dependiendo del grado de desoxidación que se necesite (figura 2).

1.2.3. Proceso de laminación. La laminación es un trabajo mecánico para deformar materiales metálicos sin arranque de viruta. Se efectúa arrastrando un material a través de dos cuerpos cilíndricos, que giran en sentido contrario al del flujo del material. Bajo esas dos fuerzas de compresión, el material a laminar experimenta un alargamiento en sentido longitudinal, así como un ensanchamiento y con ello una disminución de sección.

Figura 2. Diagrama de flujo proceso de aceración.



Fuente. Centro de documentación Acerías Paz del Río S.A.

Cuando la laminación se efectúa a temperaturas por encima de la temperatura de recristalización, se denomina “laminación en caliente” y en caso contrario, “laminación en frío”. La laminación uniforme de un lingote o una barra solo es posible si en todas las secciones la masa del lingote tiene la misma temperatura.

La empresa produce aceros clasificados por el grado de desoxidación como: calmado, semicalmado y efervescente. Los lingotes provenientes de la acería son calentados y circulados en trenes de laminación, reduciéndolos a los tamaños de los productos terminados, para luego ser almacenados y vendidos en el mercado nacional.

2. PROCESO L.W.S.: ACERÍA AL OXIGENO

En el presente capítulo se describen los diferentes componentes y operaciones del proceso de refinación de acero vía convertidor L.W.S.

2.1. PROCESO DE REFINACIÓN.

El proceso de refinación de acero (afino) tiene como objeto convertir el hierro fundido en un metal, que, por su comportamiento físico y químico, de completa satisfacción a las exigencias del consumidor. La acería cuenta, para el afino del arrabio, con dos convertidores tipo L.W.S. de 35 toneladas de capacidad nominal (éstos fueron transformados al sistema Thomas en 1981 y a L.W.S en 1985).

El proceso fue perfeccionado en Francia por las firmas industriales CREUSOT LOIRE – WENDEL SIDELOR – SPRUNCK, de donde deriva su nombre **L.W.S**, El mejoramiento consistió en la transformación del antiguo proceso Thomas, reemplazando la inyección de aire por oxígeno puro, el cual se inyecta a través de una serie de toberas ubicadas en el fondo del convertidor. La capacidad teórica instalada puede alcanzar una producción de 360.000 t/año.

La energía necesaria para que ocurran las diferentes reacciones de oxidación es proporcionada por la energía química que se desprende de la oxidación de los elementos metálicos. Esta energía es suficiente para mantener la temperatura del baño sin necesidad de combustibles externos.

Las diferentes etapas necesarias en el proceso de refinación son las siguientes:

➤ **Recepción del arrabio.** El proceso que actualmente se lleva a cabo en la acería inicia con la recepción de las cucharas que contienen el arrabio proveniente del alto horno. Estas son transportadas por vía férrea hacia el área de desescoriado, donde se retira la escoria y, además, se toma una muestra con el fin de determinar la cantidad de silicio y azufre que posee el arrabio. Si el porcentaje de silicio es mayor a 1.0 este arrabio deberá someterse a un tratamiento de desiliciado.

➤ **Desescoriado.** Las cucharas de arrabio que se envían del alto horno, traen una capa de escoria formada por la decantación del material y por pasados de escoria inevitables durante el colado. Esta debe ser eliminada para evitar perjuicios en el revestimiento del mezclador. La operación se realiza por medio de un rastrillo mecánico, un malacate para girar la cuchara y un foso receptor de escoria.

➤ **Desiliciado.** La planta desiliciadora consta de dos campanas extractoras marca **Head Wrightson**, fabricadas en Inglaterra en el año de 1969. La operación se basa en la oxidación del silicio en presencia de oxígeno inyectado a alta presión y de cal en roca como aglutinante de SiO_2 . Su capacidad nominal es de 450 toneladas de arrabio por día, pero el nivel productivo actual está cercano a 202 toneladas, lo que representa un 23% del arrabio total desiliciado, con un consumo de 5.5 m^3 de oxígeno por tonelada de arrabio y 10 kilogramos de cal por tonelada. Finalmente se entrega un arrabio con contenido en silicio por debajo del 0.8% para ser cargado al mezclador.

➤ **Mezclador.** Después de que el contenido de silicio es igual o menor del 1.0%, el arrabio es cargado al mezclador. Esta unidad operativa tiene como finalidad recibir, almacenar y homogenizar química y térmicamente el arrabio

producido en el alto horno manteniéndolo en estado líquido y a la temperatura técnicamente requerida para el proceso de producción de acero (1200-1350°C). Su función como colchón regulador, garantiza la continuidad en la producción de acero y sincroniza la operación del alto horno con la acería.

Luego, el arrabio es vertido en cucharas previamente calentadas, donde se le adiciona carbonato de sodio para bajar los porcentajes de azufre. Estas cucharas son transportadas por medio del puente grúa AC-1, el cual carga previamente el convertidor con 3 toneladas de cal en roca (fundente), 10 toneladas de chatarra en promedio, y de 33 a 37 toneladas de arrabio en el convertidor según el tipo de acero a producir.

➤ **Proceso L.W.S.** Este proceso se lleva a cabo en un reactor químico para conversión de arrabio en acero mediante un soplo separado y simultáneo de oxígeno-cal en polvo y fuel-oil, de manera ascendente, a través de toberas dobles localizadas en el fondo, lo que propicia las diferentes reacciones de oxidación de los elementos que se consideran impurezas (Si, C, Mn, P, S).

La operación normal de afino inicia con un giro de 90° del convertidor, quedando en posición vertical para recibir una inyección de oxígeno a través de las toberas a presión de 12 a 14 bares, por espacio de 35 minutos, produciéndose las reacciones de oxidación de los elementos contaminantes. Durante el soplo se inyecta por las toberas conjuntamente con el oxígeno, 1000 a 1800 Kg de cal en polvo, que refuerzan el efecto de la cal en roca adicionada anteriormente.

Tan pronto como se ha cumplido con la inyección del volumen de oxígeno, el convertidor se coloca en posición horizontal y se procede a retirar la escoria

vertiéndola en una cuba. Esta escoria se utiliza posteriormente en la planta de fertilizantes como materia prima para la elaboración de abono fosfórico (70000 t/año), gracias a su contenido de pentóxido fosfórico, cal y elementos menores.

Retirada la escoria, se procede a adicionar 1400 Kg de cal en roca para formar una barrera que retenga los residuos de escoria que aún queden en el convertidor, evitando de esta manera la refosforación. El acero "bruto" se vierte en una cuchara revestida en refractario, a la que se han agregado las ferroaleaciones y el carbono necesario para obtener la composición final del acero, que varía según la calidad que se desee obtener. Un sistema de inyección de gas inerte a la cuchara garantiza la homogenización del metal.

2.2. ETAPAS DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA L.W.S.

- **Carga.** Consiste en cargar aproximadamente 10 t. de chatarra, 32 a 37 t. de arrabio líquido, 1.5 a 2 t. de cal en polvo y 3.0 a 3.5 t. de cal en roca.
- **Inyección de oxígeno.** Se realiza por el fondo, a través de 5 toberas, a una presión de 12 a 14 bares. Este oxígeno sirve para oxidar las impurezas que trae el arrabio (Si, C, Mn, P) formando los óxidos respectivos, que son atrapados por la cal dando lugar a la formación de la escoria.
- **Desescoriado.** Consiste en retirar la escoria formada. Esta escoria se recibe en cubas y es transportada hacia la planta de fertilizantes. Después de ser molida, se transforma en abono fosfórico.
- **Agitación metalúrgica.** El nitrógeno inyectado por el fondo a través de las toberas a una presión de 7 bares, sirve para bajar la temperatura,

desoxidar y deshidrogenar el baño metálico como un último ajuste al acero líquido.

➤ **Colado.** Finalmente, el acero líquido es vertido en una cuchara. Durante el llenado se adicionan los desoxidantes y las ferroaleaciones necesarias para ajustar la composición química del acero a fabricar. Posteriormente, el acero es colado en lingoteras de sección cuadrada o rectangular de acuerdo con el producto final y trasladado a laminación vía férrea.

2.3. DESCRIPCIÓN DEL CONVERTIDOR L.W.S.

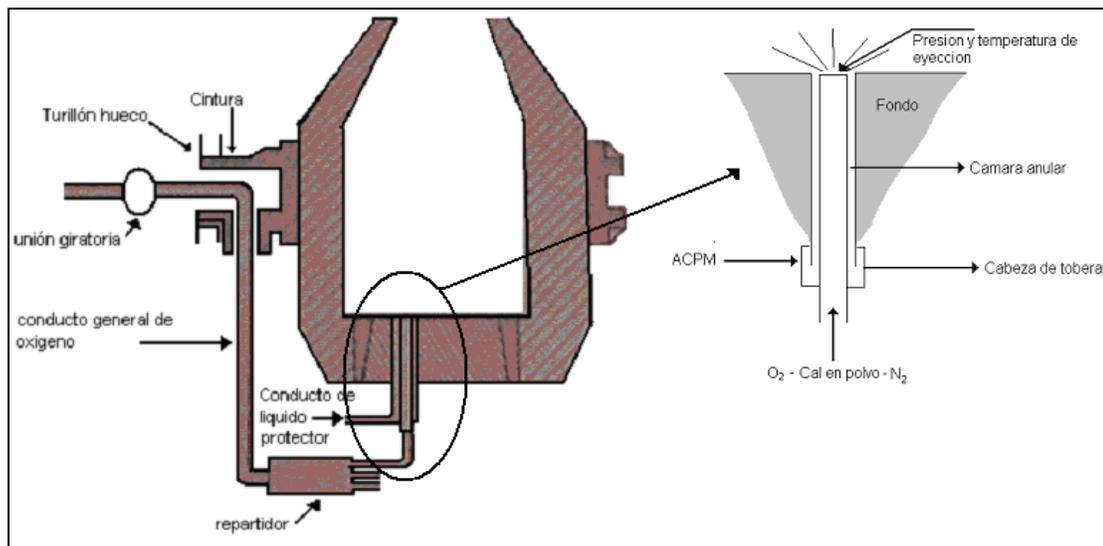
Este equipo de conversión se encuentra seccionada en tres zonas: cuerpo (sector esférico, cuerpo cilíndrico y sector cónico inferior respectivamente), cinturón y fondo. El cinturón, o anillo portante formado por piezas en acero ASTM A 387 grado 22, contiene dos muñones. Uno de éstos se integra con el sistema de engranaje mecánico de la cremallera, que le proporciona movimiento de giro al convertidor. El otro muñón hueco permite la entrada de los diferentes circuitos que transportan los fluidos para el proceso de afino. Las dimensiones del convertidor L.W.S. que opera en Acería Paz Del Río, tiene una capacidad nominal de 35 ton, 34 pies de alto, 26 pies de diámetro externo y un volumen específico de 8000 pies cúbicos.

2.3.1. Cuerpo. Se trata de un recipiente en forma de pera, fabricado actualmente en los talleres de alta mecánica que posee la empresa, teniendo en cuenta las temperaturas de la carcasa cercanas a 600°C, presencia de llama, ubicación de cubas con escoria líquida debajo del convertidor y deficiencia en el aislamiento térmico que debe proveer el refractario.

2.3.2. Cinturón. Está fabricado en el mismo acero de la carcasa. Provisto de una cremallera que ayuda al basculamiento hidráulico del equipo brindándole seguridad.

2.3.3. Fondo. El fondo del convertidor esta provisto de 5 toberas, un espesor inicial de 1.000 mm constituido de ladrillos refractarios de magnesita. Cada tobera está formada de dos tubos concéntricos, un tubo interior en cobre para el oxígeno y uno en acero para el fuel-oil (figura 3).

Figura 3. Diagrama del convertidor y una tobera.



Fuente. Autores

El cambio de un fondo L.W.S. demanda alrededor de 13 horas, 4 horas de desmontaje y 9 horas de montaje del nuevo, incluyendo la preparación del fondo. La vida útil de estos fondos está comprendida entre 350 a 400 coladas, siendo las velocidades de desgaste aproximadamente alrededor de 1.1 a 1.6 mm por carga.

2.3.4. Revestimiento refractario. La vida útil de un revestimiento es de aproximadamente 1.000 coladas con una velocidad de desgaste inferior a 0.8

mm por carga. Los ladrillos empleados en convertidores básicos al oxígeno, están compuestos en su mayoría de óxido de magnesio (MgO) y algunos de dolomita (MgO+CaO). Este porcentaje varía según la ubicación dentro del convertidor. Sobre la línea de escoria los porcentajes altos en MgO son convenientes debido a la buena compatibilidad que presenta en escorias básicas y en arrabios fosforosos, ayudando a retener el fósforo en solución. Durante el periodo de soplo con oxígeno, a medida que transcurre el afino de los elementos considerados impurezas, los refractarios son expuestos a un amplio rango de basicidad que puede ir de 1 a 6.5, donde el silicio viene a ser uno de los elementos que ayuda a deteriorar el revestimiento por ser un óxido de carácter ácido.

Los ladrillos actuales contienen MgO y carbono principalmente, son fabricados bajo un proceso de sinterización del MgO de alta eficiencia con hojuelas de grafito de alta pureza y pequeñas adiciones de algunos metales (Si, Al, y Mg), que protegen el grafito de la oxidación. Los carburos metálicos, nitruros y aleación de magnesio-aluminio forman el llamado mineral espinela, el cual forma un escudo protector sobre la cara expuesta a altas temperaturas del ladrillo, agregando fuerza y resistencia al ataque de la escoria.

2.4. TERMODINÁMICA DEL PROCESO DE AFINO

Durante el proceso de afino al oxígeno se llevan a cabo una serie de reacciones químicas exotérmicas, que dan lugar a la oxidación de las impurezas, cuyo calor es aprovechado en el convertidor para fundir la chatarra y obtener las temperaturas adecuadas para el proceso. Los óxidos formados en las reacciones son incorporados a la escoria o salen en los gases producidos. El estudio termodinámico permite conocer la probabilidad de que estas reacciones ocurran.

2.4.1. Convertidores básicos al oxígeno. En estas unidades de conversión química, el estudio del proceso durante el soplado con oxígeno se complica extraordinariamente como secuencia del número de fases y compuestos que intervienen en la operación. Entonces, la termodinámica permite obtener información acerca del estado final o equilibrio de las reacciones químicas.

La correcta comprensión de este proceso exige, entonces, el conocimiento de las relaciones termodinámicas y las leyes cinéticas. Estos dos aspectos son de igual importancia, los siguientes fenómenos muestran la complejidad del estudio cinético del proceso.

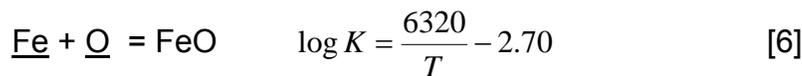
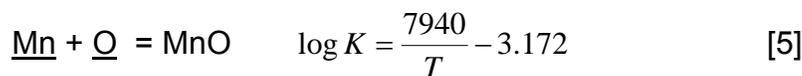
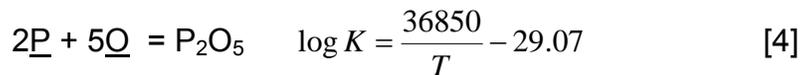
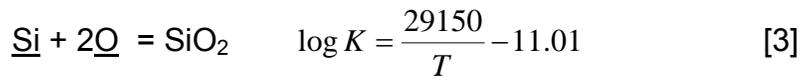
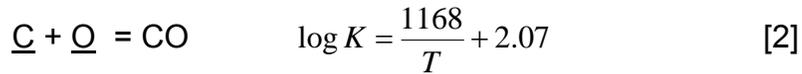
- Reacción química en las interfases de reacción.
- Interfases líquido/líquido, gas/líquido, sólido/líquido.
- Difusión de gas dentro o a través de burbujas.
- Saturación y formación de la burbuja con productos gaseosos de reacción.

2.4.1.1 Termodinámica básica. Estudios anteriores [5, 6, 9] sobre el comportamiento de las reacciones ocurridas durante el proceso de refinación, han llevado a la formulación de ecuaciones empíricas que ilustran las relaciones termodinámicas de algunos elementos presentes en el baño metálico con parámetros sencillos de medir por los metalurgistas, facilitando, de esta manera, la posibilidad de conocer la probabilidad de que las siguientes reacciones ocurran.

➤ **Principales reacciones en el proceso de fabricación de acero vía convertidor L.W.S.** Las reacciones tienen lugar cuando el oxígeno es puesto en contacto íntimo con los materiales fundidos. Las concentraciones de los elementos indeseados en el hierro son reducidas hasta niveles requeridos en el acero producido. Los datos termodinámicos para sistemas

metálicos basados en hierro, como solubilidad y actividad, son de importancia fundamental para el control de estas reacciones.

Las reacciones más importantes que ocurren dentro del convertidor son:



➤ **Determinación de ΔG mediante el diagrama de RICHARDSON-ELLINGHAM.** Para poder determinar la energía libre de Gibbs se hace necesario recurrir al diagrama de RICHARDSON-ELLINGHAM. Este permite visualizar cómo la temperatura y la composición de una atmósfera gaseosa afecta la estabilidad de los óxidos metálicos a presión constante. Por medio de una gráfica se muestra el cambio de la energía libre asociada a las reacciones de oxidación que ocurren en los procesos pirometalúrgicos (anexo 1).

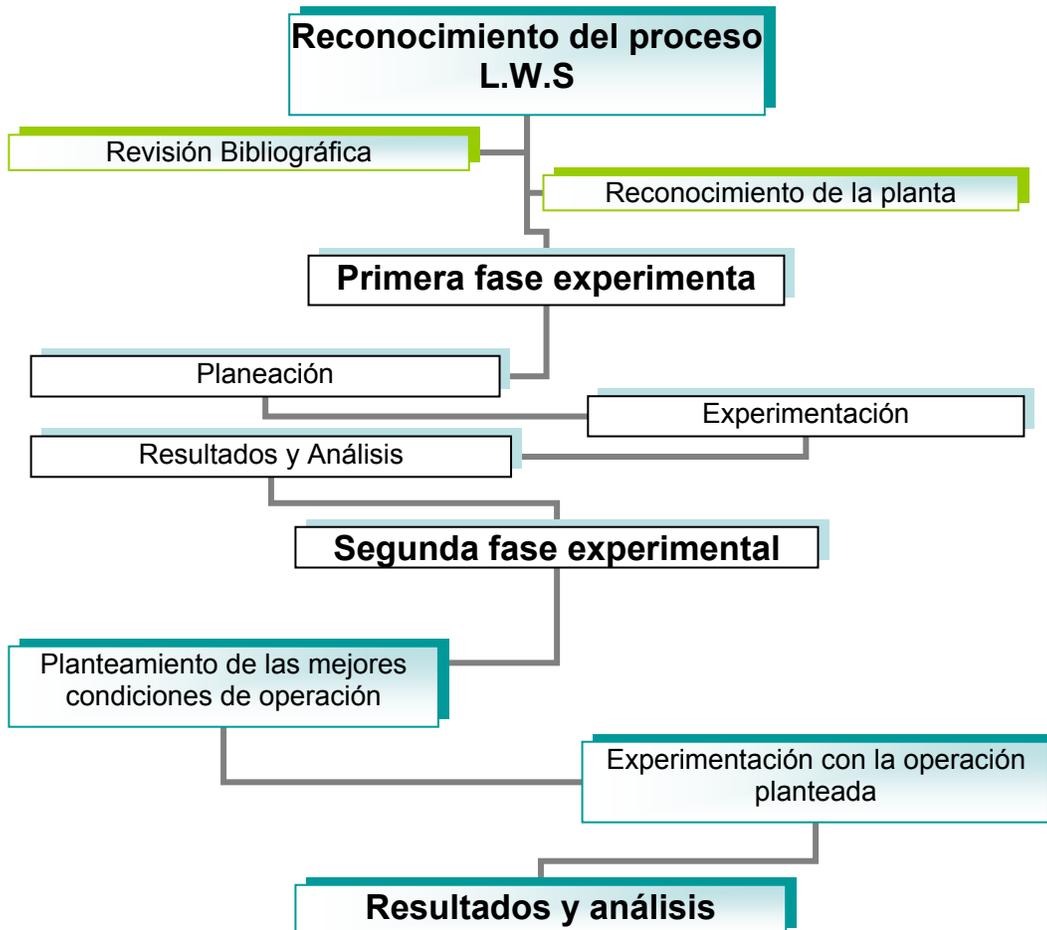
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se describen los equipos, variables de operación y procedimientos implementados en cada una de las etapas para la determinación experimental de las mejores condiciones de operación del convertidor L.W.S.

Este desarrollo se llevó a cabo con seguimientos aleatorios a condiciones puntuales en la operación normal de afino. Se midieron variables como; composición química del arrabio proveniente del mezclador, composición química del acero a través de la operación de refinación dentro del convertidor (%C, %Mn, %P, %S, %Si), análisis químico de escorias, temperaturas de arrabio y acero “bruto” en proceso, partes por millón de oxígeno disuelto dentro del baño, metros cúbicos de oxígeno suministrado a la operación de refinación, caudales de oxígeno, composición química de los diferentes tipo de cal, así como seguimientos a la reactividad , peso y tiempo de inyección de la cal en polvo.

3.1. ASPECTOS METODOLÓGICOS

El siguiente organigrama muestra la metodología que se utilizó para el desarrollo del estudio:



3.2. RECONOCIMIENTO DEL PROCESO L.W.S.

El estudio experimental de las variables de refinación de acero vía convertidor L.W.S. se llevó a cabo en condiciones reales y se aplicó a un proceso en operación, por lo que se inició con el reconocimiento en planta,

revisión de la bibliografía aportada por el personal* de la empresa y literatura original de la casa fabricante (Francia).

La información fundamental para conocimiento del proceso L.W.S, fue ampliada en la capacitación que se dió a los operarios en el área de química, mecánica de fluidos y matemáticas relacionadas con el proceso, en apoyo a los ingenieros de operación. El direccionamiento del estudio experimental lo determinó la observación en planta de la operación normal colada a colada en los tres turnos, ubicando las fortalezas y limitaciones en el momento del muestreo.

3.3. DESARROLLO DE LA PRIMERA FASE EXPERIMENTAL

Se decidió muestrear las tres calidades o tipos de arrabio clasificadas por la empresa, según su contenido en porcentaje en peso de azufre y silicio, cada una de ellas con tres repeticiones.

Tabla 1. Calidades de arrabio A.P.R.

Arrabio	%S	%Si
Tipo 1	0,02-0,1	0,3-1,0
Tipo 2	0,1-0,15	1,0-1,5
Tipo 3	0,15-0,2	1,5-2,3

Fuente. Centro de documentación Acerías Paz del Río

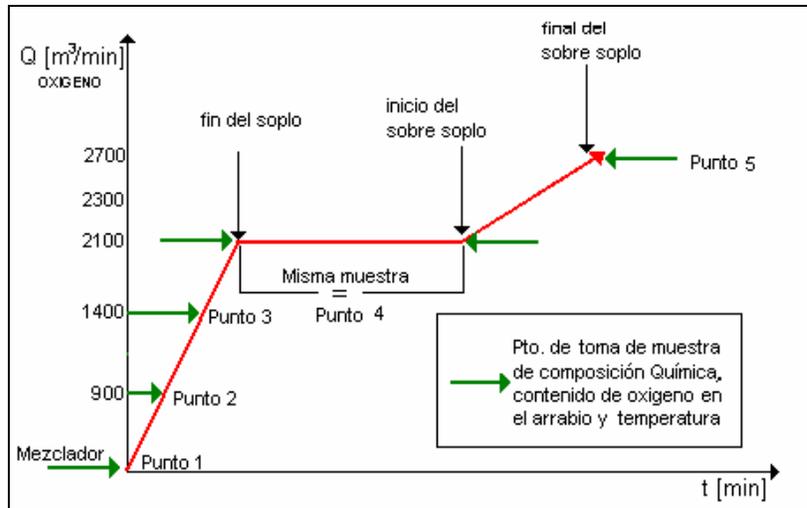
Durante el transcurso de esta fase se dió seguimiento a un total de once (11) coladas, de las cuales cuatro (4) no fueron tenidas en cuenta, debido a la falta de datos para cumplir las expectativas de la experimentación. Se tomaron tres muestras de arrabio tipo 1, tres de arrabio tipo 2 y una de arrabio tipo 3; los arrabios tipo dos y tres se soplaron en directo**.

* Personal: Trabajadores, Operarios e ingenieros de planta.

** Operación en directo: Operación de afino sin proceso de desiliciado y homogenizado en el mezclador.

3.3.1. Mecanismo de muestreo. La selección preliminar del mecanismo y puntos de muestreo contempló varios elementos del proceso: temperaturas, intervalos de tiempo, paradas, disposición del personal y costos.

Figura 4. Puntos de muestreo durante el sopleo



Fuente: Autores

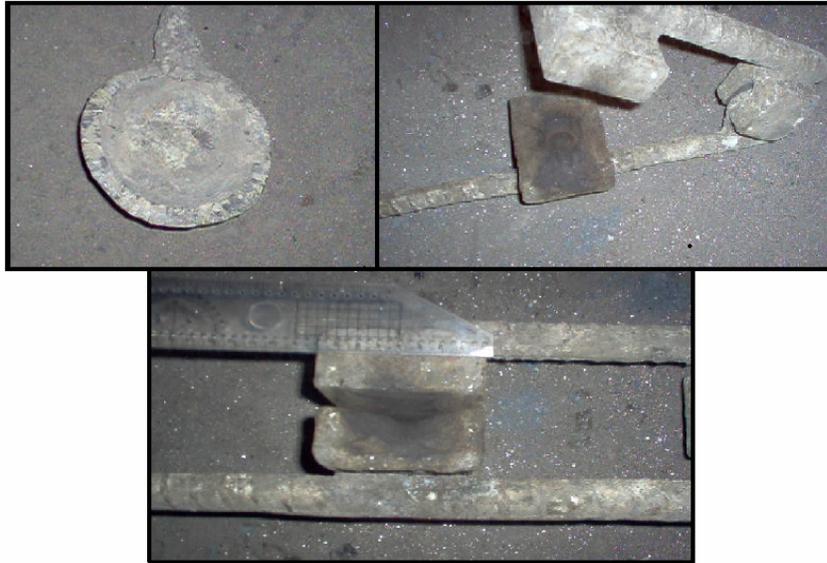
Del análisis y discusión con los ingenieros de operación** sobre los puntos de muestreo uno, dos y tres de la figura 4, se propuso el diseño de un instrumento para muestreo de arrabio y acero líquido en el mezclador y convertidor respectivamente. Ello con el fin de evitar, al máximo, los traumatismos, paradas y pérdidas de tiempo de la operación normal del convertidor. Para el cuarto y quinto punto de muestreo (figura 4), se emplearon los muestreadores expermix diseñados para el muestreo del acero dentro del convertidor.

3.3.2. Muestreo de la composición química del arrabio. Para el muestreo del arrabio líquido en el mezclador, se fabricó una coquilla, que consta de una cámara receptora sobre la que se vierte una cantidad pequeña de

** Reunión realizada el 20 de marzo en el tercer turno.

arrabio (figura 5). Este adquiere la forma de la cámara para luego ser encapsulada y enviada vía neumática al laboratorio para su análisis en el espectrómetro de emisión óptica; los resultados son reportados telefónicamente al operador del convertidor L.W.S. e ingresados al sistema SAC*.

Figura 5. Toma muestra para arrabio líquido

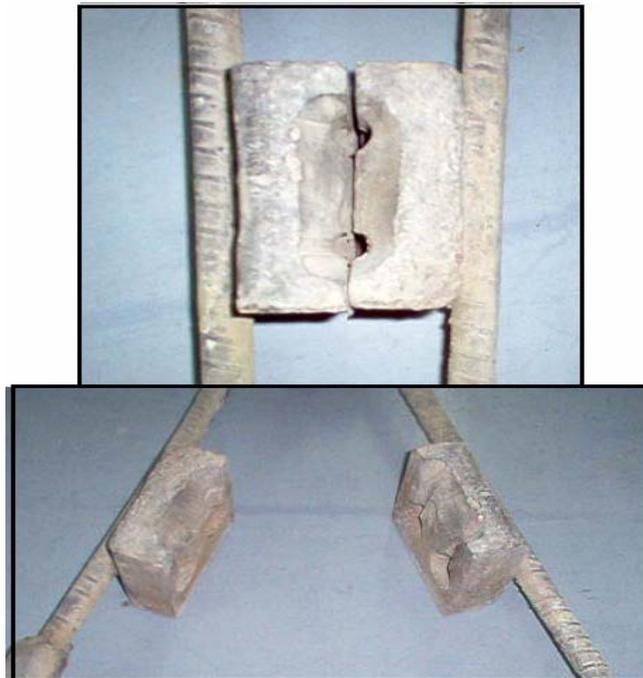


Fuente. Autores.

3.3.3. Composición química del acero en “bruto” durante la inyección de oxígeno. Para esta medición de acero en “bruto” se utilizó un instrumento conformado de un toma muestra de dos cavidades (figura 6)- que aumentó la capacidad de recepción- el cual fue adherido a un brazo sujetador (3 m de largo) que brindó seguridad en el momento de su manipulación en los puntos 2 y 3 (figura 4).

* SAC: Sistema de Análisis y Calidad, software donde se reportan los análisis de laboratorio y es consultado por todos los operarios a través de la red interna.

Figura 6. Toma muestra de afino



Fuente. Autores

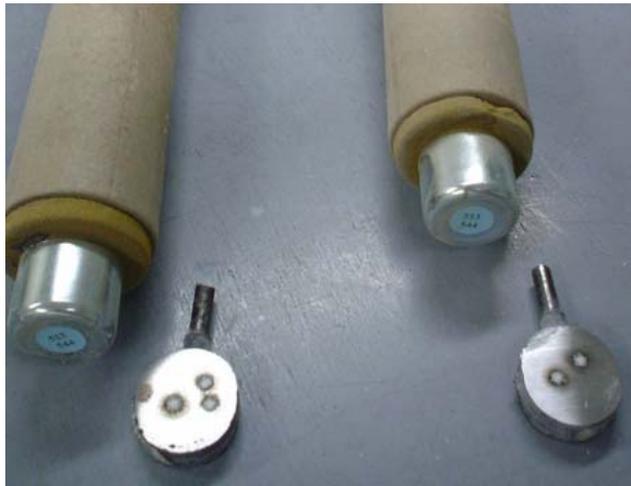
Para los puntos cuatro y cinco conocidos como: Soplo y sobre soplo respectivamente dentro del convertidor, se apoyó en la versatilidad del toma muestras spermix, (figura 7) de la firma Heraneus Electro-Nite Internacional. Este funciona cuando el baño metálico adquiere gran fluidez y temperaturas elevadas mayores a los $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, formando una moneda de espesor adecuado para ser analizada rápidamente en el espectrómetro de emisión óptica.

Las muestras de arrabio y acero que no se analizaron a través del espectrómetro de emisión óptica, por ser muy porosas, fueron enviadas al laboratorio de análisis químico, el cual analizó las muestras por medio de un espectrómetro de absorción atómica, procedimiento mostrado en el Anexo3.

3.3.4. Muestreo de la concentración del oxígeno disuelto. La determinación de la actividad del oxígeno en el baño fundido es una medición

electro química mediante un equipo llamado Multi-lab III, donde un sistema de celda denominado Celox (figura 7), utiliza un sensor desechable para determinar el contenido activo del oxígeno en el acero. Este sensor va montado en un tubo de cartón, que se inserta en una lanza permitiendo la inmersión en el baño metálico. Además, en la cabeza se ubica un termopar común tipo 10% Pt-PtRh, que se emplea para medir la temperatura, una celda constituida por un tubo de MgO estabilizado con ZrO_2 que actúa como electrolito y un relleno de polvo de Cr/Cr_2O_3 como referencia de un electrodo central de Mo, los detalles del sensor se presentan en el anexo B.

Figura 7. Toma muestra Espermix



Fuente. Autores

➤ **Equipo Multilab-III versión 2.1**

Este instrumento analítico (figura 8), fue desarrollado específicamente para la industria del acero, hierro y fundiciones no-ferrosas. Esta unidad es de gran versatilidad para guiar al operario paso a paso a través de cada procedimiento. Emplea un software base el cual mide, calcula y despliega los valores de temperatura (Anexo 2), concentración de oxígeno disuelto en

el baño, fuerza electromotriz, lo que ayuda a controlar el proceso de producción en tiempo real.

Figura 8. Equipo Multilab III



Fuente. Autores

Para obtener los resultados exactos en la medición de oxígeno, se deben tener las siguientes precauciones:

- Los sensores deben estar guardados en un lugar seco.
- La lanza y el cable de la extensión debe estar en buenas condiciones. Muchos de los errores de las medidas son el resultado de lanzas o cables defectuosos.
- El sensor debe asegurarse bien sobre la lanza y debe transpasar la capa de escoria, para sumergirse en el metal líquido a una profundidad de 30 a 40 centímetros, lejos de la carcasa del convertidor.
- Durante la inmersión del celox debe detenerse la agitación metalúrgica con nitrógeno.
- Es necesario respetar un tiempo en la inmersión del celox de 60 segundos.
- El intervalo de temperatura está entre 1570 y 1740 °C

3.4. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

Para la toma de la temperatura en los puntos uno, dos y tres de la figura 4, se utilizó un termopar de inmersión (figura 9), que presenta una exactitud del alambre comprendido entre 0 a ± 4 °C en 1554 °C*. La toma de temperatura de los puntos cuatro y cinco se efectuó con el equipo Celox antes descrito.

Figura 9. Termopar de inmersión.



Fuente. Almacén planta de aceración.

3.5. MUESTREO DE CAL EN ROCA, POLVO Y BARRERA

La composición de la cal en operación de afino vía convertidor L.W.S. es de interés para el estudio, debido al papel que desempeña como aglutinante de impurezas dentro del proceso siderúrgico. Los parámetros analizados en laboratorio fueron; %CaO, %Al₂O₃, %SiO₂, %MgO, %R₂O₃, %PPC y reactividad. El muestreo de la primera fase experimental se realizó en los diferentes tipos de cal previa a las coladas muestreadas.

* Dato proporcionado directamente por Heraneus Electro-Nite Internacional a los autores.

Para la segunda fase experimental, el muestreo y posterior análisis en laboratorio de los diferentes tipos de cal fueron sustituidos por el reporte diario promedio de la planta de calcinación, pues no se encontró gran variación con la cal analizada en la primera fase.

3.5.1. Cal en polvo Maerz. Este tipo de cal industrial recibe el nombre de su proceso de producción, el cual presenta buena homogeneidad del producto, mayor reactividad, y pérdidas por calcinación* bajas, características importantes en el momento de aglutinar los óxidos dentro del convertidor. Por otra parte, la pulverización permite un contacto íntimo con los óxidos disueltos en el baño metálico al ser inyectada a través de las toberas con el oxígeno gaseoso. En la primera fase se tomó la muestra de una trampa de finos ubicada en la tubería que transporta la cal al Dp (deposito de cal molida). La figura 10a muestra el Dp con su respectiva muestra de cal en polvo.

3.5.2. Cal en roca Maerz para la barrera. Para llevar acabo el procedimiento final de colado del acero en “bruto”, procesado dentro del convertidor, es necesario contar con una cal de características especiales que provea un último aglutinamiento de los óxidos y, además, que evite el paso de escoria líquida a la cuchara de colado.

Se muestreó en la canastilla antes del cargue al convertidor (Figura 10b). Su peso se tomó como constante en mil cuatrocientos kilogramos (400 Kg), luego de ser comprobado por triplicado en la báscula móvil del mezclador de arrabio. Los resultados se observan en la tabla 2.

Tabla 2. Seguimiento al peso de la cal de la barrera

* Pérdidas pro calcinación (ppc) porcentaje de Dióxido de carbono contenido en la cal en forma de carbonato de calcio

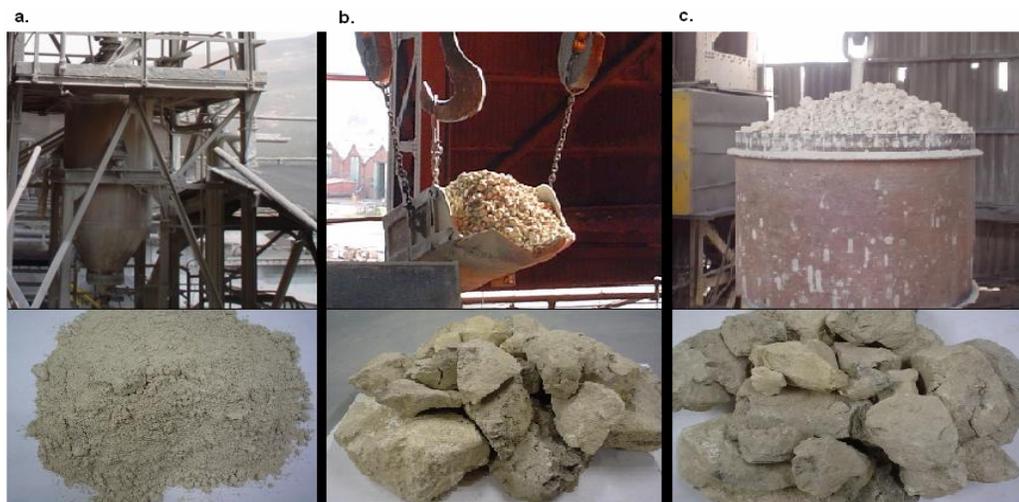
Colada	Peso de cal de la barrera(kg)
27149	1390
27339	1410
27042	1380
Δ de peso	6,7

Fuente: Autores

3.5.3. Cal en roca Priest para el soplo. Este tipo de cal industrial presenta gran heterogeneidad por tratarse de un horno que da una baja regulación en el proceso de calcinado, produciendo cales de baja reactividad y altas pérdidas por calcinación. En el proceso L.W.S. esta cal disminuye las proyecciones metálicas, sirve como fundente y amortigua el daño en el refractario por el cargue de la chatarra al inicio de la operación.

La muestra se tomó de la canastilla de cargue (figura 10c). Esta canastilla es cargada en los silos de almacenamiento de la planta de calcinación según la calidad de cal requerida (Priest o Maerz). El peso se registra en la báscula del carro cal el cual tiene una precisión de ± 10 Kg

Figura 10. Muestras de cal: a. Dosificador de cal en polvo (Dp), muestra. b. Cesta de cal de la barrera, muestra. c. canasta de cargue de cal en roca para el soplo, muestra.



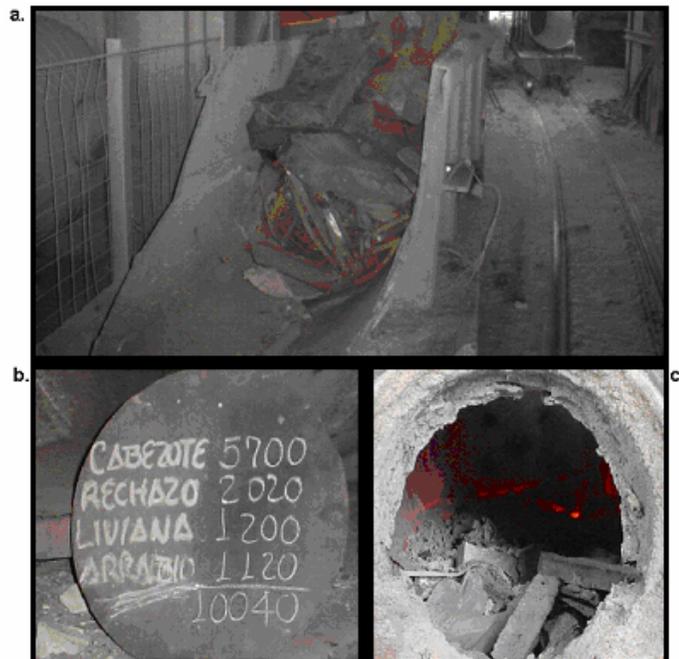
Fuente. Autores

En el análisis de las muestras de los diferentes tipos de cal, el laboratorio de análisis químico utilizó la marcha química indicada en el Anexo 3,

3.6. CHATARRA

La chatarra cargada al convertidor L.W.S. figura 11a, es en su totalidad de producción interna*.

Figura 11. a. Canasta para el cargue de la chatarra. b. Reporte de peso chatarra. c. Chatarra cargada al convertidor.



Fuente. Autores

* Estudios Realizados por acerías Paz del Río S.A. "Clasificación y normalización de la Chatarra de Acerías Paz del Río S.A."

Para la determinación de la composición química de esta variable –chatarra- se aprovecharon estudios anteriores realizados en la empresa. Los resultados reportados sobre los diversos tipos de chatarra cargados al convertidor se encuentran en la tabla 3.

Tabla 3. Porcentajes promedio de la composición química de la chatarra cargada al convertidor L.W.S.

TIPO DE CHATARRA		COMPOSICION QUÍMICA				
		%Fe	%C	%P	%S	%Si
1	Rechazo de arrabio	75-85	3,0-4,0	2,0-3,0	0,1-0,2	1,0-2,0
2	Rechazo de corte de boca y fondos de cuchara	75-86	3,0-4,1	2,0-3,1	0,1-0,3	1,0-2,1
3	Sobrantes de colada	75-87	3,0-4,2	2,0-3,2	0,1-0,4	1,0-2,2
4	Chatarra de producción interna	96	3	>0,03	>0,01	>0,1
5	Chatarra de lamina	96	3	>0,03	>0,01	>0,1
6	Despunte de palanquilla	96	3	>0,03	>0,01	>0,1
7	Despunte de tocho	96	3	>0,03	>0,01	>0,1

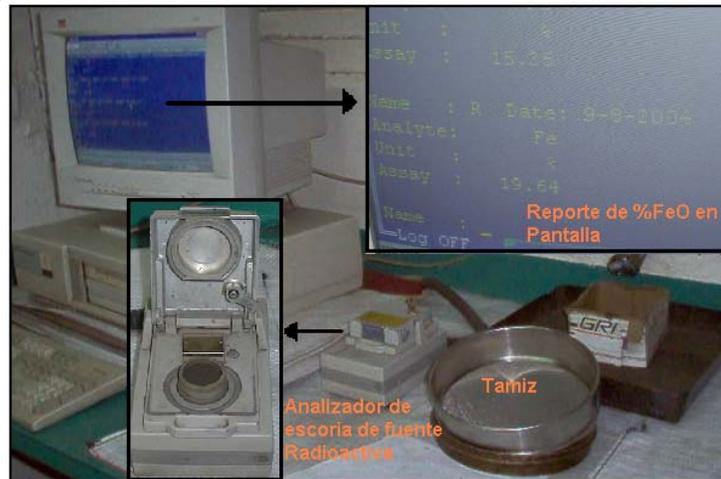
Fuente. Acerías Paz del Río S.A.

Durante la realización de la primera fase, el muestreo de esta variable se limitó al seguimiento de su peso y calidad. En el 70% de los muestreos se realizó un seguimiento visual a la calidad de la chatarra cargada y al cumplimiento en el reporte del peso. En la figura 11b, se muestra la tarjeta de información del peso proveniente de los patios de chatarra. En la figura 11c se observa la chatarra cargada en el convertidor preparada para la operación de afino.

3.7. MUESTREO DE ESCORIAS

Debido a que la escoria es un material de gran pastosidad fácilmente adherible a cualquier superficie, el instrumento utilizado en la recolección de muestras consistió en una varilla de 4m de longitud que se sumergía en el baño metálico por unos segundos, para luego ser retirada y llevada a un molino pulverizador donde adquiriría una granulometría aceptada para el análisis del contenido de % FeO en el analizador portátil de emisión atómica, con fuente radioactiva (figura 12).

Figura 12. Analizador de escoria de fuente radioactiva.



Fuente. Autores

Las muestras recolectadas en el transcurso del estudio fueron enviadas al laboratorio de análisis químico (procedimiento en Anexo 2) con el fin de obtener una medida confiable del porcentaje en óxido de hierro (% FeO) presente en las escorias del soplo y fin de soplo para el estudio experimental.

3.8. OXÍGENO REQUERIDO

3.8.1. Balances de materia. Los balances de materia preliminares para el proceso de afino L.W.S, buscan encontrar el oxígeno teórico requerido en las diferentes reacciones de oxidación de los elementos considerados impurezas(C, Mn, P, S, Si), y que vienen a dar un punto de comparación con la operación real en planta.

W_n = Peso del elemento n (Kg)

$W_{O_2(MO)}$ = Peso de oxígeno requerido para oxidar el elemento M (Kg)

X_{n_i} = Fracción en peso del elemento n en la corriente i

➤ Oxígeno requerido para la oxidación del carbono. El carbono es oxidado por el oxígeno formando en un 95% CO (estequiométricamente se calcula

con la ecuación [2] sección 2.4.1.1) y en un 5% CO₂^[9], este último se calcula estequiométricamente por la ecuación [7]

$$\underline{C} + \underline{O} = \text{CO}_2 \quad [7]$$

$$W_C = XC_{\text{Arrabio}} * W_{\text{Arrabio}} + XC_{\text{Chat.liv}} * W_{\text{Chat.liv}} + XC_{\text{Chat.Pes}} * W_{\text{Chat.Pes}} + XC_{\text{Chat.Rech}} * W_{\text{Chat.Rech}} - XC_{\text{acero}} * W_{\text{Arrabio}}$$

$$W_{O_2(\text{CO-CO}_2)(\text{Estequimetrico})} = W_C * \left[\frac{16}{12} * .95 + \frac{32}{12} * .05 \right]$$

➤ Oxígeno requerido para la oxidación del manganeso.

Estequiométricamente se halla con la ecuación [5] sección 2.4.1.1.

$$W_{Mn} = XMn_{\text{Arrabio}} * W_{\text{Arrabio}} + XMn_{\text{Chat.liv}} * W_{\text{Chat.liv}} + XMn_{\text{Chat.Pes}} * W_{\text{Chat.Pes}} + XMn_{\text{Chat.Rech}} * W_{\text{Chat.Rech}} - XMn_{\text{acero}} * W_{\text{Arrabio}}$$

$$W_{O_2(\text{MnO})(\text{Estequimetrico})} = W_{Mn} * \frac{16}{55}$$

Oxígeno requerido para la oxidación del fósforo. Estequiométricamente se halla con la ecuación [4] sección 2.4.1.1

$$W_P = XP_{\text{Arrabio}} * W_{\text{Arrabio}} + XP_{\text{Chat.liv}} * W_{\text{Chat.liv}} + XP_{\text{Chat.Pes}} * W_{\text{Chat.Pes}} + XP_{\text{Chat.Rech}} * W_{\text{Chat.Rech}} - XP_{\text{acero}} * W_{\text{Arrabio}}$$

$$W_{O_2(\text{P}_2\text{O}_5)(\text{Estequimetrico})} = W_P * \frac{80}{61.9}$$

➤ Oxígeno requerido para la oxidación de azufre. De la remoción de azufre por el carbonato de sodio en polvo adicionado al arrabio antes de cargar al convertidor no se tienen cálculos. Para la eliminación de esta impureza por oxidación son necesarias condiciones especiales.^[8] Esta reacción ocurre poco dentro del convertidor, sin embargo, debido a la gran influencia que tiene el elemento sobre las propiedades físicas y mecánicas del acero se tiene en cuenta para efectos de cálculos, pero recordando que su mayor remoción se realiza por tratamientos en cuchara^[8].



$$W_S = XS_{Arrabio} * W_{Arrabio} + XS_{Chat.liv} * W_{Chat.liv} + XS_{Chat.Pes} * W_{Chat.Pes} + XS_{Chat.Rech} * W_{Chat.Rech} - XS_{acero} * W_{Arrabio}$$

$$W_{O_2(SO_2)(Estequiometrico)} = W_{Si} * \frac{32}{32}$$

Oxígeno requerido para la oxidación del silicio, estequiométricamente se halla con la ecuación [3] sección 2.4.1.2

$$W_{Si} = XSi_{Arrabio} * W_{Arrabio} + XSi_{Chat.liv} * W_{Chat.liv} + XSi_{Chat.Pes} * W_{Chat.Pes} + XSi_{Chat.Rech} * W_{Chat.Rech} - XSi_{acero} * W_{Arrabio}$$

$$W_{O_2(SiO_2)(Estequiometrico)} = W_{Si} * \frac{32}{28}$$

➤ Oxígeno requerido para formar el óxido de hierro (FeO) en la escoria. Estequiométricamente se calcula con el uso de la ecuación [6] sección 2.4.1.1.



$$W_{O_2(FeO)(Estequiometrico)} = W_{Escoria} * \frac{\% FeO}{100} * \frac{16}{55.8}$$

La concentración de oxígeno disuelto medida ppm de O₂, se convierte a % en peso. Junto con el peso del acero bruto refinado se calcula el peso del oxígeno en el baño. Para el cálculo de los metros cúbicos necesarios en cada una de las coladas para oxidar los elementos metálicos (impurezas) dentro del convertidor, se utilizó el volumen molar de 22.31 m³/Kg.

Todas las coladas estudiadas se sometieron a estos balances de materia y los resultados están reportados bajo una hoja de cálculo. (Tabla 4). En ella se contempló la composición química del arrabio a cargar y la composición

química del acero esperado con la incidencia de la chatarra y el porcentaje de óxido de hierro obtenido en el fin de soplo

Tabla 4. Hoja de cálculo del balance de materia realizado para cada colada.

BALANCE DE MATERIA CONVERTIDOR L.W.S												
ARRABIO					CHATARRA RECHAZO ARRABIO SOLIDO							
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%C	%Mn	%P	%S	%Si			
3,33	0,27	1,96	0,047	0,64	3,5	0,2	2,1	0,18	1,6			
COMPOSICIÓN FINAL DEL ACERO REFINADO					CHATARRA RECHAZO CUBAS DE ESCORIA							
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%C	%Mn	%P	%S	%Si			
0,03	0,03	0,03	0,03	0	0,003	0,04	0,005	0,02	0			
W. del arrabio	38200				CHATARRA RECHAZO SOBRANTES DE COLADA							
W. del acero	37958,94				%C	%Mn	%P	%S	%Si			
W. Chatarra liviana(kg)	1800				0,07	0,23	0,3	0,034	1,33			
W. Chatarra pesada(kg)	5200				CHATARRA RECHAZO BOCA DEL CONVERTIDOR							
W. Chatarra rechazos(kg)	3000				Kg de O ₂	%C	%Mn	%P	%S	%Si		
W. del Carbono (kg)	1349,891318				1717,862336	3,1	0,4	2,3	0,4	0,9		
W. del manganeso Kg	154,362318				44,9054016	PROMEDIO CHATARRA RECHAZO						
W. del fósforo Kg	793,357318				1025,340637	ppm O ₂	900	%C	%Mn	%P	%S	%Si
W. del azufre Kg	16,138318				16,138318	2,5073	0,337	1,8605	0,3144	0,888		
W. del silicio Kg	280,22				320,2514286	PROMEDIO CHATARRA DE PRIMERA						
m ³ de Oxígeno	2448,969779				3514,216723	%C	%Mn	%P	%S	%Si		
W de escoria	10000					0,2	0,75	0,003	0,002	0,13		
%FeO 1 bajada	16											
W de FeO	1600											
Kg O ₂ para formar FeO	355,5555556											
	constantes objetivo											
	constantes											
	Variables por colada											
	Ecuaciones											

Fuente: Autores

3.9 SENGUNDA FASE EXPERIMENTAL O FASE FINAL

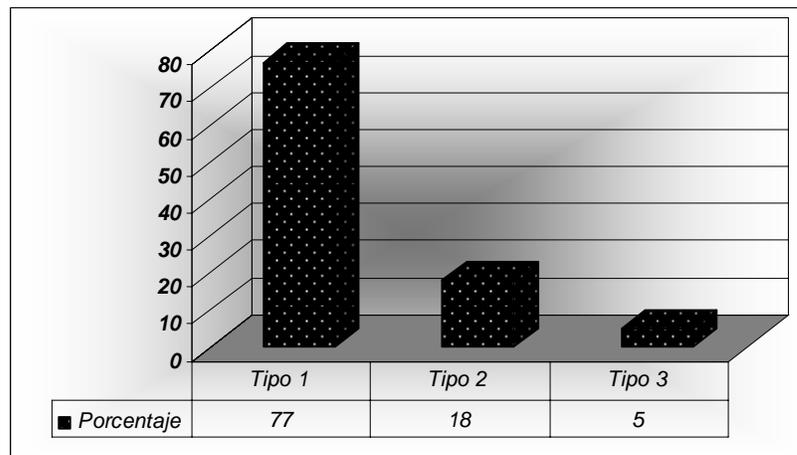
La operación se realizó con las condiciones de operación propuestas. En el planteamiento de esta etapa se escogieron los puntos de muestreo uno, cuatro y cinco de la figura 4. Para el arrabio y acero en “bruto” se analizó temperatura y composición química, solo para el soplo y fin de soplo[^] se analizó escoria y se midió la concentración de oxígeno disuelto (ppm de O₂).

[^] Para el fin del soplo, solo en coladas con problemas en la operación normal.

3.9.1. Planteamiento de la operación del convertidor L.W.S. Se buscó muestrear el mayor número de coladas para hacer representativos los resultados. El intervalo de estudio se definió para arrabios tipo uno, por ser éste el de mayor repetitividad en el cargue al convertidor, figura 13 y, a su vez, se dividió en arrabios de bajo contenido en silicio ($<0,7$) y altos en silicio mayores a $0,7$.

Los mecanismos de muestreo e instrumentación para las muestras recolectadas y sus análisis químicos en los puntos de muestra son los requeridos en operación normal del proceso, (spermix, celda celox, varilla recolectora de escoria y termopar de inmersión). El análisis de la cal estuvo sujeto al reporte diario de la planta de calcinación y, por lo tanto, no se recolectaron muestras para las coladas estudiadas en esta fase.

Figura 13. Estadística de arrabio a la salida del mezclador, primer semestre 2004.



Fuente. Acerías Paz del Río S.A.

➤ **Arrabios de bajo contenido en Silicio.** Se determinó el intervalo de operación para el afino de arrabios con bajos contenido de silicio. Se

considera un arrabio de bajo contenido en silicio el que posee una composición química promedio como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Composición química promedio de un arrabio bajo en silicio.

%C	%Mn	%P	%S	%Si
3,5	0,26	2,3	0,7	<0,7

Fuente. Autores

➤ **Arrabios de alto contenido en Silicio.** Se determinó el intervalo de operación para el afino de arrabios con altos contenido de silicio. Se considera un arrabio de alto contenido en silicio el que posee una composición química promedio como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Composición química promedio de un arrabio alto en silicio

%C	%Mn	%P	%S	%Si
3,5	0,26	2	0,7	0,7<Si>1,0

Fuente. Autores

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El análisis y discusión de los resultados para la determinación de las mejores condiciones de operación del convertidor L.W.S., se desarrolló a partir de las características físico-químicas de los arrabios Paz del Río y del estudio de las variables más influyentes del proceso L.W.S. El aporte de la investigación culmina con lineamientos claros de operación del convertidor, para arrabios tipo uno bajos en silicio y altos en silicio.

4.1. PRIMERA FASE EXPERIMENTAL

4.1.1. Chatarra. Los resultados para este material están limitados a las condiciones de operación actual. El estudio considera como constante el peso cargado al convertidor en diez toneladas, debido a que esta masa de chatarra es poco variable durante el seguimiento experimental (ver tabla 7).

Tabla 7. Reporte del peso cargado para cada una de las coladas muestreadas

	Colada N°	Liviana	Pesada	Rechazo	Total (kg)
Tipo 1	27042		6520	3600	10120
	27149	5840		4200	10040
	27339	1210	4800	4020	10030
Tipo 2	36603	8910		1100	10010
	37050		5240	4820	10060
	37214		4320	5750	10070
Tipo 3	27365	8900		1200	10100

Fuente. Autores

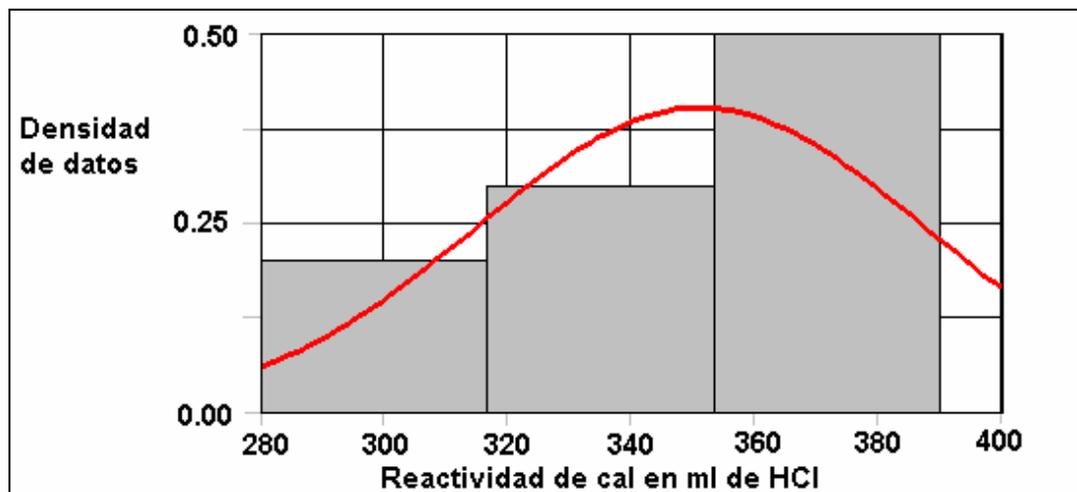
Las calidades de chatarra cargadas al convertidor dependen de las existencias en los patios de recuperación metálica y a criterios –composición química de la chatarra- de los operadores, por ello es necesario el reporte de estos en los balances de materiales para efectos de cálculos, ya que al representar la chatarra aproximadamente el 30% del material metálico

cargado al convertidor, ésta determina en gran medida el grado de impurezas que el proceso debe eliminar.

4.1.2. Muestreo de cal. Los resultados de los diferentes tipos de cal correspondientes a la primera fase se pueden ver en el (anexo 4).

➤ **Muestreo de cal en roca para la barrera.** Este tipo de cal está condicionada para el proceso siderúrgico por medio de la reactividad. La empresa estipula como parámetro de calidad aceptable, una reactividad por encima de dosientosochenta mililitros de ácido clorhídrico. La figura 14 muestra el seguimiento a este parámetro y deja en claro el rango propicio de la reactividad para el trabajo de seguimiento, lo que asegura en un 95% la calidad de la cal para el estudio.

Figura 14. Probabilidad de ocurrencia de la reactividad de la cal en roca para el soplo cargada al convertidor.

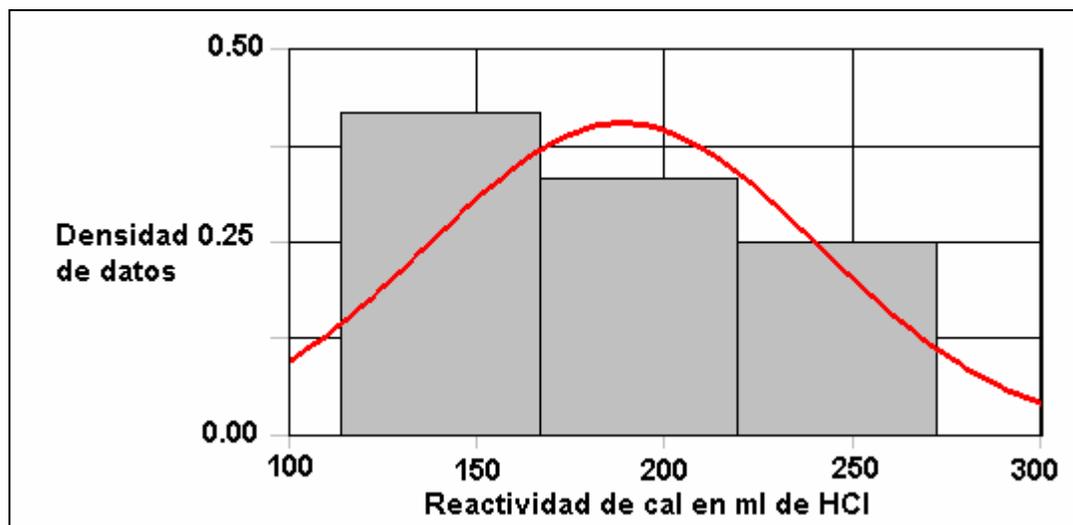


Fuente. Autores

➤ **Muestreo de cal en roca para el soplo.** Este tipo de cal es fundamental para el inicio de la operación de afino, actuando como fundente y neutralizador del silicio. Los resultados que se presentaron en el seguimiento

experimental poseen gran incertidumbre debido a que no existe un tipo de cal "Priest" con reactividad homogénea promedio. En la figura 15 se observa la gran variabilidad de este parámetro, sólo se pudo asegurar para el estudio el cuarenta por ciento por encima de la calidad exigida por la empresa (200 ml de HCl)

Figura 15. Probabilidad de ocurrencia de la reactividad de la cal Priest en roca para el soplo cargada al convertidor.



Fuente. Autores

➤ **Muestreo de cal en polvo para el soplo.** El estudio estimó que el 40 % de cal en polvo posee una reactividad por encima del 340 ml de HCl. Si se asume el informe mensual de calidad para materias primas de la empresa, en el intervalo de 330-360 ml de HCl como aceptable, se asegura una escoria suficientemente básica que atrape las impurezas del baño en su paso por el baño metálico.

Tabla 8. Inyección de cal en polvo

Colada	Inyección de cal en polvo				%FeO soplo
	m ³ de O ₂	Kg	m ³ de O ₂	Kg	
28936	460	1500	2150	200	12,1
28414	400	1000	2040	500	12,7
28419	400	800	2170	800	14,9
28420	500	800	0	0	8,6
28423	550	1000	0	0	11,4
28451	500	1000	0	0	8

Fuente. Autores

En la tabla 8 se observa claramente que el aumento en la cantidad de cal en polvo en el proceso L.W.S, beneficia notablemente el porcentaje de FeO. La interrelación de la escoria con los óxidos presentes en el baño ^[8] permite una buena remoción de estos. Se sugiere un intervalo de cal en polvo inyectada entre 1900 a 2300 kg para el desarrollo de la segunda fase.

4.1.3. Muestreo de escorias. Los resultados de la composición química de las diferentes escorias se reportan en el anexo 4 y el contenido de oxido de hierro se reporta en la tabla 9. Con estos resultados la empresa determinó las medidas correspondientes a la calibración y certificación del analizador de escorias, al encontrarse diferencias en los análisis de laboratorio.

Tabla 9. Reporte de %FeO en la escoria L.W.S

	N de Colada	%FeO analizador	%FeO Laboratorio	Delta
tipo 1	27042 soplo	9,6	12,5	2,9
	27042 sobresoplo	18,1	21,5	3,4
	27149 soplo	13,8	16,08	2,28
	27149 sobresoplo	24	28,8	4,8
	27339 soplo	12,7	15,55	2,85
	27339 sobresoplo	19,9	25,35	5,45
tipo 2	37050 soplo	10,1	12,42	2,32
	37050 sobresoplo	17,2	22,42	5,22
	37214 soplo	10,1	14,24	4,14
	37214 sobresoplo	26	31,85	5,85
	36603 soplo	20,4	22,3	1,9
	36603 sobresoplo	22,3	25,1	2,8
tipo 3	27365 soplo	16,7	21,7	5
	27365 sobresoplo	22,3	24,5	2,2
			PROMEDIO	3,65071429

Fuente. Autores

En la tabla anterior se observa claramente que el 70% de las coladas cumple con la oxidación requerida * para la terminación del procedimiento. Este resultado propone un procedimiento sin sobre soplo, el cual se probará teniendo en cuenta las limitaciones del proceso L.W.S. para la segunda fase experimental.

4.1.4. Concentración del oxígeno disuelto. La medida de concentración de oxígeno requirió para su ajuste confiable datos reales de la operación. Estos fueron proporcionados por los autores a la firma Heraeus Electro-Nite Internacional, como resultado del seguimiento a un número representativo de coladas (ver anexo 2).

Tabla 10. Resultados de la concentración de Oxígeno

	Nº de Colada	ppm de O ₂ Soplo	ppm de O ₂ sobre Soplo
Tipo 1	27042	1035,6	915,98
	27149	783,83	1296
	27339	553,7	846
Tipo 2	36603	698	951
	37050	1122,9	1297
	37214	795,15	1574,15
Tipo 3	27365	632	893

Fuente: Autores

La tabla 10 muestra la variabilidad del oxígeno disuelto en el baño, este resultado es independiente del arrabio a procesar. En el control de la operación se requiere que el oxígeno total disuelto en el baño no supere las 900 ppm de O₂, con el fin de utilizar este acero en bruto para la fabricación de cualquier tipo de acero.

4.1.5. Inyección de oxígeno en operación normal. Para efectos del estudio se estandarizó la operación normal que actualmente se mantiene.

* Parámetro de control de porcentaje de Oxido de Hierro en la escoria final mayor a 15%

Esta realiza un sobre soplo destinado a corregir errores al final de la operación. La tabla 11 muestra el perfil de inyección de oxígeno para un soplo típico en la operación del convertidor. Los datos para la operación de cada una de las coladas muestreadas se puede observar en el anexo 4.

Tabla 11. Operación normal de operación convertidor L.W.S.

Intervalo de m ³ de Oxígeno	Flujo de Oxígeno m ³ /min.	m ³ de Oxígeno	Kg. de cal en polvo inyectada
0-400	200		
400-1100	100	450	1000
1100-1600	150		
1600-2100	200		
2100-2350	100	2150	500
0-300 o 500*	100	150	500

*corrección de Sobre soplo

Fuente. Autores

El oxígeno total requerido para oxidar los elementos metálicos presentes en el baño se estimó con base a balances de materia. Estos presentaron un volumen menor de oxígeno necesario para procesar cada una de las coladas estudiadas como lo muestra la tabla 12. Hecho que permitió sugerir un perfil de inyección de oxígeno familiar a los trabajadores y de fácil operación.

Tabla 12. Oxígeno calculado con balances de materia Vs oxígeno real inyectado.

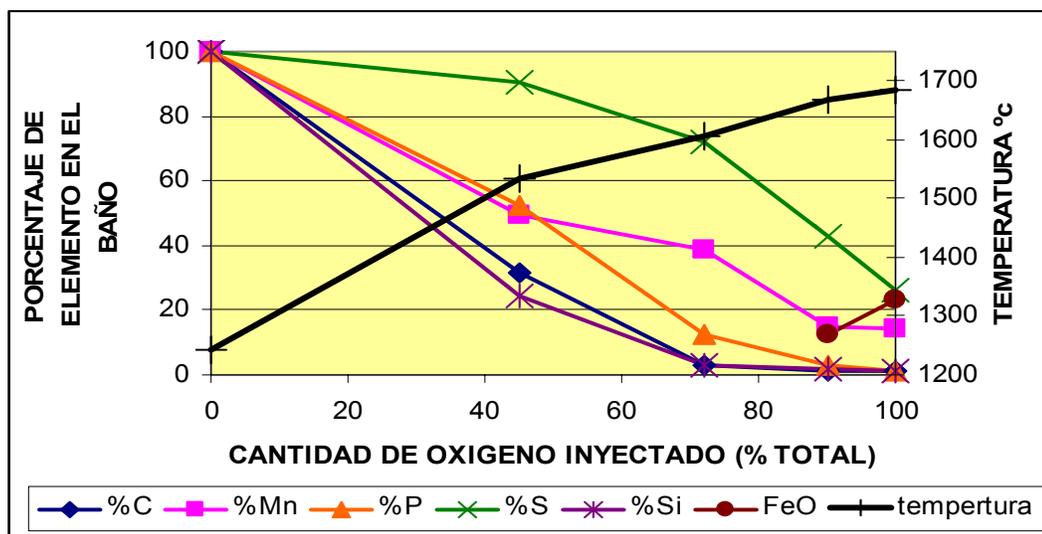
	Nº de Colada	M ³ DE O ₂ CALCULADO	M ³ DE O ₂ REAL	Δ De O ₂
tipo 1	27042	2595,85	2653	57,15
	27149	2346,73	2356	9,27
	27339	2532,7	2550	17,3
Tipo 2	36603	2528,92	2534	5,08
	37050	2425,74	2459	33,26
	37214	2521,35	2562	40,65
Tipo 3	27365	2477,6	2841	363,4

Fuente. Autores

En la tabla anterior, cada una de las coladas muestreadas aportó un lineamiento al estudio a través de los resultados de la primera fase

experimental. A continuación se reportan comportamientos químicos porcentuales de los diferentes tipos de arrabio procesados en el convertidor L.W.S durante el tiempo que transcurre el soplo. Figuras 16, 17 y 18 respectivamente. Un análisis detallado de los elementos que intervienen en el afino del arrabio a acero en bruto se trata seguidamente:

Figura 16. Comportamiento porcentual promedio de los elementos químicos durante la inyección de oxígeno a arrabios tipo 1.



Fuente: Autores

➤ Carbono: su oxidación se produce rápidamente desde el ingreso del oxígeno al convertidor. Se observa un cambio repentino de pendiente (figura 16) representado en un aumento de la temperatura. Este hecho hace pensar en la oxidación del elemento a la temperatura del baño^[9]. Una característica física de la descarburación está reflejada por una flama brillante e intensa que se propaga 15,00 metros por encima de la boca del convertidor con un comportamiento lineal descendente hasta aproximadamente un 75% del total de la operación.

- Manganeso: Las bajas concentraciones de este elemento no provocan cambios observables que influyan en la calidad del acero en bruto ^[6]. La mayor parte de su oxidación se produce al cumplirse el 50% de la totalidad del soplo. Su porcentaje en peso para todos los tipos de arrabio es de poca variabilidad.

- Fósforo: la oxidación de este elemento está relacionada con la del carbono, puesto que el monóxido de carbono liberado reduce el anhídrido Fosforico (P_2O_5) y lo retorna al baño (refosforación) ^[9].

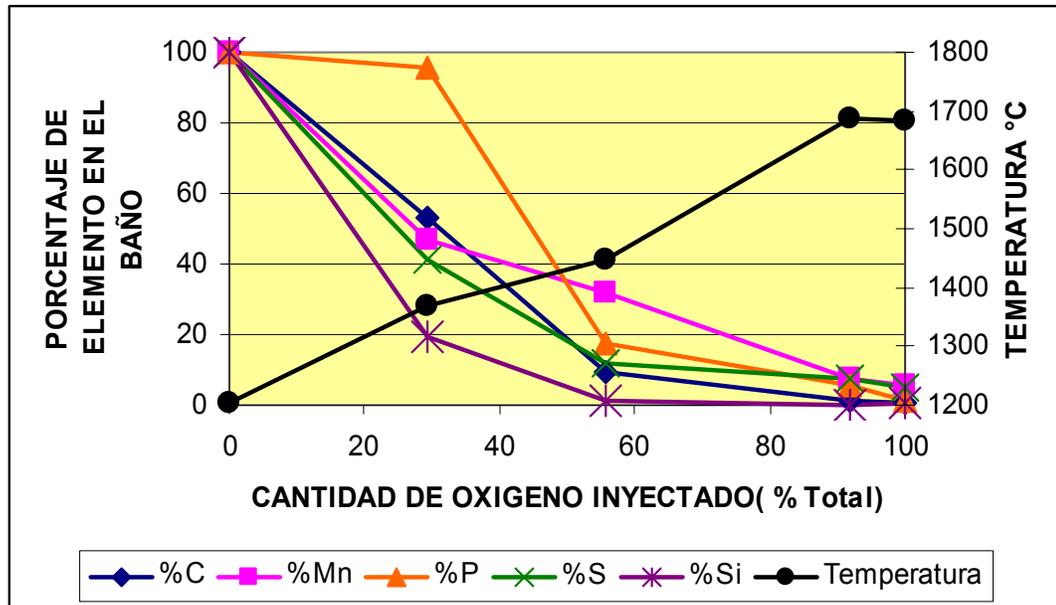
- Azufre: presenta un descenso favorable para el acero al final de la operación, teniendo en cuenta que el propósito del proceso L.W.S no es desulfurar.

- Silicio: elemento altamente termógeno, presenta el mayor descenso por metro cúbico de oxígeno inyectado.

En la figura 16 se muestra cómo la temperatura aumenta su pendiente durante la disminución acelerada del carbono y silicio. Otro cambio ocurre cuando inicia la oxidación del Mn, ocasionada principalmente por la oxidación del hierro.

El comportamiento químico del arrabio tipo dos se observa en la figura 17. En este se analiza la acelerada disminución de la mayoría de los componentes:

Figura 17. Comportamiento porcentual promedio de los elementos químicos durante la inyección de oxígeno a arrabios tipo 2.



Fuente. Autores

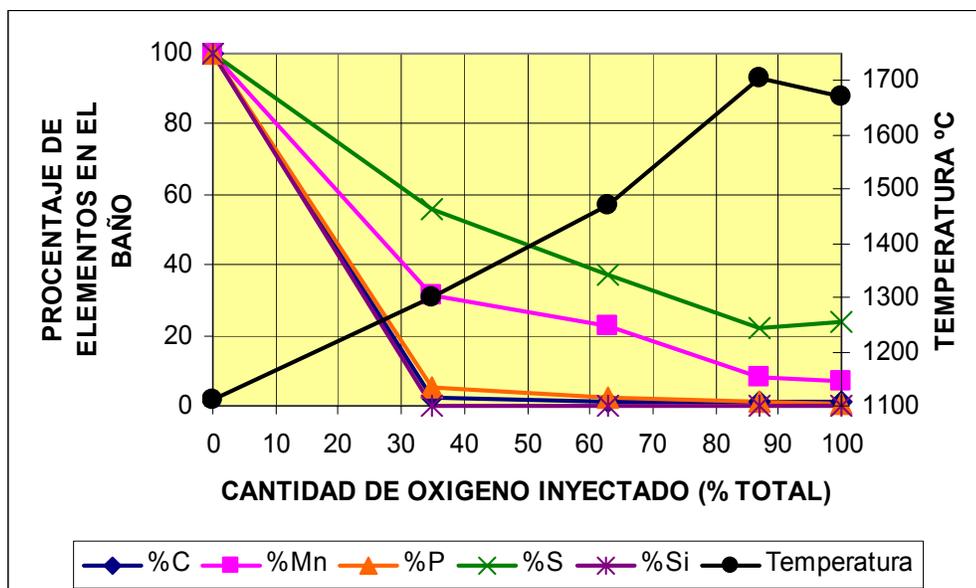
- Carbono: se comporta de manera similar al tipo uno, con pendiente más pronunciada y guardando un comportamiento lineal hasta el 50% de la inyección de oxígeno. El cambio repentino que toma la línea del fósforo confirma la relación guardada con el carbono.
- Manganeso: comportamiento similar al del arrabio tipo uno.
- Fósforo: es el elemento de más variación con respecto al arrabio tipo uno. La pendiente al igual que en el anterior se relaciona con la disminución del carbono y la oxidación acelerada del óxido de hierro.
- Azufre: presenta un raro descenso durante toda la operación, se cree que es propiciado por el aumento en la temperatura del baño, ocasionada por los altos contenidos en silicio y carbono.

➤ Silicio: la conducta tradicional de este elemento presenta el mayor tránsito en los primeros minutos del soplo.

La temperatura aumenta su pendiente hasta un 55% del oxígeno inyectado (figura 17). De aquí en adelante los elementos termógenos aportan poca energía química quedando en abundancia el hierro, este elemento provoca cambios de temperatura por efecto de su oxidación, reflejado en los reportes de escoria (tabla 9). Se observa que en la operación del arrabio tipo dos se realiza con exceso de oxígeno innecesario para lograr un buen afino.

El arrabio tipo tres presenta una disminución rápida de los componentes del baño, debido al aumento acelerado de la temperatura y a un mayor gasto de oxígeno (tabla 12). No se realiza discusión sobre la evolución de los elementos presentes en el arrabio tipo tres por falta de una muestra representativa. (Figura 18).

Figura 18. Comportamiento porcentual de los elementos durante la inyección de oxígeno al arrabio tipo 3.



Fuente. Autores

Es de recordar que este tipo de arrabio en operación normal nunca es cargado al convertidor, debido a que los óxidos de silicio bajan la basicidad de la escoria permitiendo el ataque al revestimiento básico.

4.2. SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL

En esta fase se plantean las mejores condiciones de operación para el convertidor L.W.S. como resultado del estudio de las variables en la primera fase experimental. Para la realización se definieron dos intervalos “bajo y alto en silicio” de arrabio tipo uno.

Tabla 13. Mejores condiciones de operación para arrabios bajos en silicio.

Limite inferior de operación						
			CAL EN POLVO			
m ³ de Oxígeno aproximados	Caudal m ³ /min.	% de O ₂ inyectado	% de O ₂ inyectado	% en peso total	Peso de cal	
Soplo	0	322	250	14		
	322	920	100	40	18	1000
	920	1610	150	70		
	1610	2070	250	90		
	2070	2300	100	100	85	600
Oxígeno total	2300*					
* dato para cada una de las coladas basados en los balances de materia y correlaciones experimentales						
Limite superior de operación						
			CAL EN POLVO			
m ³ de Oxígeno aproximados	Caudal m ³ /min.	% de O ₂ inyectado	% de O ₂ inyectado	% en peso total	Peso de cal	
Soplo	0	414	250	18		
	414	1150	100	50	18	1300
	1150	1610	150	70		
	1610	2070	250	90		
	2070	2300	100	100	85	800
Oxígeno total	2300*					
* dato para cada una de las coladas basados en los balances de materia y correlaciones experimentales						

Fuente. Autores

Para el primer intervalo (tabla 12), se estudiaron cinco coladas para arrabios bajos en silicio, de donde se obtuvo una propuesta general basada en los balances de materia (tabla 13), experimentación de la primera fase y datos estadísticos, buscando un soplo calmado y de bajas proyecciones durante el transcurso de la operación.

En el segundo intervalo dentro del arrabio tipo uno trajo como propuesta general de operación los resultados mostrados en la tabla 14, para arrabios considerados altos en silicio. Al igual que los bajos en silicio, se tuvo en cuenta para la determinación de las mejores condiciones de operación, balances de materia, experimentación de la primera fase y datos estadísticos.

Tabla 14. Mejores condiciones de operación de arrabios altos en silicio

Limite inferior de operación						
			CAL EN POLVO			
m ³ de Oxígeno aproximados		Caudal m ³ /min	% de O ₂ inyectado	% de O ₂ inyectado	% en peso total	Peso de cal
Soplo	0	336	250	14		
	336	1200	100	50	18	1000
	1200	1680	150	70		
	1680	2160	250	90		
	2160	2400	100	95	85	600
Sobresoplo	2400*					
* dato para cada una de las coladas basados en los balances de materia y correlaciones experimentales						
Limite superior de operación						
			CAL EN POLVO			
m ³ de Oxígeno aproximados		Caudal m ³ /min	% de O ₂ inyectado	% de O ₂ inyectado	% en peso total	Peso de cal
Soplo	0	384	250	16		
	384	960	100	40	18	1300
	960	1680	150	70		
	1680	2160	250	90		
	2160	2400	100	100	85	800
Oxígeno total	2400*					
* dato para cada una de las coladas basados en los balances de materia y correlaciones experimentales						

Fuente. Autores

La comprobación de las condiciones de operación presentadas en las tablas 13 y 14, se constataron en condiciones reales de planta en la segunda fase experimental, comprobando el buen comportamiento de los perfiles sugeridos por los autores.

4.2.1. Resultados de la experimentación final. Luego del planteamiento de las mejores condiciones de operación del convertidor L.W.S, se procedió a la realización de seguimientos aleatorios bajo los perfiles proporcionados por los investigadores para cada una de las coladas. En las tablas 15 y 16 se observa la operación planteada por los autores para cada una de las coladas.

Tabla 15. Planteamiento de la operación teórica para cada una de las coladas a muestrear

	Nº de Colada	m ³ de O ₂ calculado	m ³ de O ₂ esperado	OPERACIÓN				
				250 m ³ de O ₂ /min	100 m ³ de O ₂ /min	150 m ³ de O ₂ /min	250 m ³ de O ₂ /min	100 m ³ de O ₂ /min
PRIMER INTERVALO 0,5≤Si≤0,7	28226	2294,4	2299,5	413,9*	1149,7	1609,6	2069,5	2299,5
	28230	2360,5	2373,0	427,1	1186,5	1661,1	2135,7	2373,0
	28242	2386,2	2401,5	432,3	1200,8	1681,1	2161,4	2401,5
	28354	2338,8	2348,8	422,8	1174,4	1644,2	2114,0	2348,8
	37486	2169,2	2160,3	388,9	1080,1	1512,2	1944,3	2160,3
	37667	2322,6	2330,8	419,6	1165,4	1631,6	2097,8	2330,8
SEGUNDO INTERVALO 0,71≤Si≤0,9	28211	2434	2454,7	441,8	1227,3	1718,3	2209,2	2454,7
	28212	2208	2203,4	396,6	1101,7	1542,4	1983,1	2203,4
	28265	2454,6	2477,6	446,0	1238,8	1734,3	2229,8	2477,6
	37641	2195,2	2189,2	394,1	1094,6	1532,4	1970,3	2189,2
	37642	2404,7	2422,1	436,0	1211,1	1695,5	2179,9	2422,1

*lo cual indica que se debe operar con un flujo de 250 m³ de O₂/min. hasta inyectar 413,9 m³ de O₂ al baño.

Fuente. Autores

En la tabla 15 se presentan los caudales de oxígeno calculados a partir de los balances de materia y los empleados en operación real para cada una de las coladas. Estos se encuentran dentro del intervalo de las mejores condiciones de operación del convertidor L.W.S. para los dos tipos de arrabio definidos por los investigadores como los de mayor recurrencia y por lo tanto mayor interés en la operación normal del convertidor (tablas 13 y 14).

Tabla 16. Planteamiento de la inyección de cal en polvo teórica para cada una de las coladas a muestrear.

	Nº de Colada	Inyección de cal en polvo			
		m ³ de O ₂ *	Kg, de cal	m ³ de O ₂ **	Kg de cal
PRIMER INTERVALO 0,5≤Si≤0,7	28226	504*	1300	2157	800
	28230	519	1300	2219	800
	28242	525	1300	2243	800
	28354	515	1300	2198	800
	37486	477	1300	2039	800
	37667	511	1300	2183	800
SEGUNDO INTERVALO 0,71≤Si≤0,9	28211	535	1300	2288	800
	28212	486	1300	2076	800
	28265	540	1300	2307	800
	37641	483	1300	2063	800
	37642	529	1300	2260	800
*Indica el volumen del oxígeno donde de inyecta la cal el polvo requerida para aglutinar los óxidos de silicio.					
**Indica el volumen del oxígeno donde de inyecta la cal el polvo requerida para aglutinar el pentóxido de fósforo.					

Fuente. Autores

En la tabla 16 se presentan los puntos de inyección de cal en polvo requeridos en el estudio para lograr un mejor cumplimiento de los parámetros de control*.

Las condiciones extremas de temperatura, paradas y fallas en el suministro de materias primas en planta ocasionaron un rechazo de varias coladas, éstas se muestran en la tabla 17 indicando las coladas desechadas por los investigadores a causa de procedimientos mal efectuados.

* Parámetros de control: %FeO en la escoria, ppm de O₂ y Temperatura del acero en "bruto".

Tabla 17. Coladas descartadas por el estudio.

Nº de Colada	m ³ de O ₂ ESPERADO	OPERACIÓN					sobre soplo 100	
		m ³ de O ₂ OPERADO	250	100	150	250		100
28936	2370,2	2537	370,0	1327,0	1602,0	2132,0	2324	2537,0
28414	2405,1	2583	368,0	1050,0	1640,0	2030,0	2268	2583,0
28419	2280,0	2505	320,0	1000,0	1680,0	2080,0	2272	2505,0
28420	2310,0	2546	400,0	1000,0	1600,0	2150,0	2325	2546,0
28423	2258,6	2492	380,0	1140,0	1600,0	2150,0	2258	2492,0
28451	2430,5	26669	400,0	900,0	1400,0	2200,0	2340	26669,0

Inyección de cal en polvo					
Colada	m ³ de O ₂	Kg	m ³ de O	Kg	%FeO
28936	460	1500	2150	200	12,1
28414	400	1000	2040	500	12,7
28419	400	800	2170	800	14,9
28420	500	800	0	0	8,6
28423	0	roca	0	0	11,4
28451	500	1000	0	0	8

Composición química del acero						
Colada	%C	%Mn	%P	%S	%Si	T°C
28936	0,02	0,5	0,36	0,022	0,002	1632
28414	0,02	0,04	0,08	0,028	0,002	1610
28419	0,037	0,05	0,03	0,03	0,002	1688
28420	0,05	0,32	0,21	0,045	0,002	1689
28423	0,04	0,06	0,05	0,03	0,002	1679
28451	0,04	0,03	0,11	0,04	0,002	1654

Fuente. Autores

La operación real para cada una de las coladas muestreadas en esta fase final se observan en las tablas 18 y 19.

Tabla 18. Operación real cada una de las coladas a muestreadas

	Nº de Colada	m ³ de O ₂ esperado	m ³ de O ₂ operado	OPERACIÓN					sobre soplo 100m ³ de O ₂ /min
				250 m ³ de O ₂ /min	100 m ³ de O ₂ /min	150 m ³ de O ₂ /min	250 m ³ de O ₂ /min	100 m ³ de O ₂ /min	
PRIMER INTERVALO 0,5≤Si≤0,7	28226	2299	2672	420*	917	1510	2270	2398	2672
	28230	2373	2531	436	1330	1544	2165	2373	2531
	28242	2402	2658	448	1100	1384	2197	2300	2658
	28354	2339	2478	400	1005	1728	2074	2356	2478
	37486	2160	2600	428	967	1430	2060	2150	2600
	37667	2331	2620	400	1270	1670	2040	2300	2620
SEGUNDO INTERVALO 0,71≤Si≤0,9	28211	2455	2698	420	1100	1510	2200	2398	2698
	28212	2203	2639	430	1040	1818	2100	2250	2639
	28265	2478	2875	300	1100	1450	1945	2325	2875
	37641	2189	2762	400	110	1606	2104	2281	2762
	37642	2422	3271	460	1004	1476	2195	2500	3271

*lo cual indica que se debe operar con un flujo de 250 m³ de O₂/min. hasta inyectar 413,9 m³ de O₂ al baño.

Fuente. Autores

Con estos resultados de operación real, se logra observar la inseguridad por parte de los operarios al dar por terminado el proceso de afino.

Tabla 19. Operación real de la Inyección de la cal en polvo para cada una de las coladas muestreadas

	Nº de Colada	Inyección de cal en polvo			
		m ³ de O ₂ *	Kg, de cal	m ³ de O ₂ **	Kg de cal
PRIMER INTERVALO 0,5≤Si≤0,7	28226	550	1200	2300	700
	28230	420	1400	2200	400
	28242	531	1000	2200	800
	28354	410	1500	2105	400
	37486	552	900	2100	800
	37667	585	900	2104	600
SEGUNDO INTERVALO 0,71≤Si≤0,9	28211	550	1200	2250	300
	28212	542	1200	2150	600
	28265	558	1234	2120	500
	37641	456	1500	2160	400
	37642	400	1000	2091	410

*Indica el volumen del oxígeno donde de inyecta la cal el polvo requerida para aglutinar los óxidos de silicio.
 **Indica el volumen del oxígeno donde de inyecta la cal el polvo requerida para aglutinar el pentóxido de fósforo.

Fuente. Autores

Los resultados de la tabla 19 muestran discrepancias entre la inyección de cal en polvo propuesta por los investigadores y la que realmente fue administrada por los operarios, es de resaltar que las coladas obtenidas no presentaron inconformidad en los resultados de la operación.

El resultado del contenido de óxido de hierro en la escoria del muestro se observa en la tabla 20

Tabla 20. Resultados de contenido de FeO

	Colada	% FeO esperado	%FeO Experimental
PRIMER INTERVALO 0,5≤Si≤0,7	28226	16,0	16,2
	28230	16,0	14,4
	28242	16,0	15
	28354	16,0	13,9
	37486	16,0	14
	37667	16,0	15
SEGUNDO INTERVALO 0,71≤Si≤0,9	28211	16,0	15,4
	28212	16,0	14,8
	28265	16,0	12,9
	37641	16,0	13,4
	37642	16,0	15,8

Fuente. Autores

La comprobación del funcionamiento de los perfiles planteados se refleja en la composición Química, temperatura y ppm de O₂, tabla 21.

Tabla 21. Composición Química, temperatura y ppm de O₂ para el acero en bruto.

	Colada	%C	%Mn	%P	%S	%Si	T °C esperada	T °C Experimental	ppm de O ₂
PRIMER INTERVALO 0,5≤Si≤0,7	28226	0,02	0,5	0,36	0,022	0,002	1650,0	1651	791
	28230	0,02	0,04	0,28	0,019	0,002	1650,0	1670	709
	28242	0,037	0,04	0,03	0,025	0,002	1650,0	1606	850
	28354	0,032	0,04	0,025	0,022	0,002	1650,0	1652	805
	37486	0,04	0,06	0,029	0,024	0,002	1650,0	1643	795
	37667	0,029	0,071	0,04	0,02	0,003	1650,0	1641	750
SEGUNDO INTERVALO 0,71≤Si≤0,9	28211	0,022	0,06	0,031	0,022	0,002	1670,0	1670	760
	28212	0,025	0,094	0,083	0,028	0,003	1670,0	1665	750
	28265	0,044	0,033	0,021	0,022	0,003	1670,0	1672	830
	37641	0,015	0,036	0,034	0,021	0,002	1670,0	1652	790
	37642	0,03	0,03	0,035	0,025	0,002	1670,0	1641	980

Fuente. Autores

Análisis de los resultados de la segunda fase experimental. Podemos decir que la temperatura cumplió un papel fundamental en el 100% de las coladas, obteniéndose como beneficio un parámetro controlado que se emplea en las siguientes operaciones. De este modo, los ingenieros cuentan

con temperaturas superiores a la temperatura de liquidus (1550°C) para el proceso de colado.

La operación dentro del convertidor se realiza sin tener en cuenta el acero a fabricar. Solo la concentración final de oxígeno disuelto (ppm de O_2) proporcionara la calidad de los aceros. Los excelentes resultados arrojados en el cumplimiento del porcentaje de FeO en la escoria final, hacen pensar en una pronta implantación del estudio, obviando el proceso de fin de soplo para las coladas que no presenten anomalías en el suministro de las materias primas o traumatismos en la operación del convertidor.

El ahorro de tiempo se hace evidente por la disminución del gasto del oxígeno y el aumento de fósforo en la escoria anexo 4. Los contenidos de P_2O_5 , aumentarían por lo que el proceso de desescoriado tomaría gran importancia. Se requiere un estudio de este nuevo subproducto con el fin de aumentar su valor agregado.

El contenido de Oxígeno disuelto al final del proceso de refinación en el baño metálico para cualquier tipo de acero a producir está aproximadamente en 700 a 900 ppm de O_2 ^[10].

4.3. ANALISIS ECONOMICO

Este análisis pretende definir los costos y beneficios del estudio ^[12] realizado en el convertidor L.W.S con el fin de mostrar su viabilidad en el caso de llegar a ser implantado por Acerías Paz del Río S.A.

Para el cálculo de la inversión total (Tabla 22), se tuvieron en cuenta unos insumos (j) en las cantidades Y_{jt} , con una inversión por unidad de P_{jt} .

$$C_t = \sum Y_{jt} * P_{jt}$$

Tabla 22. Inversión

Concepto	Cantidad (Yjt)	Inversion por unidad	Inversion (It)
Inversion Inicial			10859,904
Tiempo muestreo 1ª fase	40	180	79200
Desviacion coladas	10	40	1440000
Celox	21	12	90720

Fuente. Autores

Inversión total (C_t) : US\$ 1.620.779,90

Esta inversión se proyecta para ser desembolsada a un año. Los beneficios que se esperan conseguir están relacionados con un ahorro en los metros cúbicos de oxígeno y que a su vez se reflejan en el incremento de la producción gracias a la reducción del tiempo (5 minutos/colada muestreada) necesario por colada.

Esta reducción del oxígeno trae beneficios en términos monetarios a la empresa mediante la implementación de las mejores condiciones de operación del convertidor L.W.S.

$$B_t = \sum X_{it} * P_{it}$$

Tabla 23. Beneficio

Concepto	cantidad (Xit)	Beneficio Unitario (Pit)	Beneficio(Bt)
Oxigeno	150	0,44	784080
Tiempo (min)	3	180	5832000
Numero de coladas	3	4800	5184000

Fuente. Autores

Beneficio Total (B_t) : US\$ 11.800.080,00 /Año

El beneficio neto estimado para el proyecto es favorable, debido a que los beneficios son mayores que la inversión total donde.

$$BN_t = B_t - I_t = \sum_i X_{it} * P_{it} - \sum_j Y_{jt} * P_{jt} > 0$$

Beneficio total (BN_t) : US\$ 35.584,00 / día

Un criterio, que determina a un mas lo beneficioso que puede llegar resultar el estudio, es la rentabilidad. Esta relación es la más acertada para decidir si vale o no la pena realizar la inversión.

Valor actual del beneficio (VAB) / Valor actual de la inversión (VAI) ≥ 1

$$VAB / VAI = 7,28$$

$$VAB > VAI \rightarrow VABN > 0$$

Se obtienen 7,28 pesos por cada peso invertido en el proyecto. Por lo tanto el estudio se muestra como una buena opción para la empresa que se encuentra en el proceso de reconversión industrial.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en el desarrollo de las etapas establecidas para este proyecto se concluye lo siguiente:

- Se estimó el comportamiento químico experimental durante el transcurso de la operación de refinación de acero vía convertidor L.W.S. para cada uno de los tipos de arrabio con los que cuenta la empresa Acerías Paz del Río S.A.
- La estandarización de los perfiles de soplo para arrabios tipo 1 aseguran un mejor cumplimiento en los parámetros de control establecidos para el proceso L.W.S.
- Durante el análisis de las materias primas se estimó la relevancia que tiene la cal en polvo durante el proceso de refinación de acero vía convertidor L.W.S.
- Los cálculos del balance de masa correspondiente a las características físico químicas propias del arrabio Paz del Río S.A., funcionan correctamente para el oxígeno requerido por los elementos que se consideran indeseables y que deben ser oxidados con oxígeno gaseoso.
- La hoja de cálculo propuesta da una guía al operador durante el proceso, llevando esto a una operación más estándar. Con lo que se disminuye el factor humano.
- En el análisis económico se muestra un beneficio del proyecto de \$70'689.584/día.

6. RECOMENDACIONES

- Disminuir los tiempos de transporte, cargue del arrabio y estandarizar la operación del mezclador
- Se requiere ambientalmente un manejo adecuado de los humos de chimenea que aproveche la energía y disminuya el impacto del proceso.
- Es necesario la realización de un estudio encaminado a la disminución de emisiones altamente contaminantes a la atmósfera como: monóxido de carbono, dibenzodioxinas, dibenzofuranos y polihalogenados, provenientes en las materias cargadas (chatarra, arrabio) al proceso de afino.
- Para efectos del estudio y a las condiciones de Acerías Paz del Río, sería de gran importancia analizar la cinética y termodinámica a través de una firma especializada con instrumentación adecuada, debido a las condiciones extremas de operación.
- Se deja como propuesta la posterior realización de un estudio experimental que estime las mejores condiciones de operación para los arrabios con contenidos superiores de silicio a 1.0%.

BIBLIOGRAFÍA

ARENAS M. “Manual manejo de Fluidos Proceso L.W.S. “.Documento Acerías Paz Del Río S.A., Belencito 1981. Capitulo 2, 3 y 4, Pg. 24-53.

CARLIER K. On-line oxygen measurements during liquid steel processing using novel electrochemical sensors. Heraeus Electro-Nite International N.V., Centrum-Zuid 1105, 3530 Houthalen, Belgium.

CASTAÑO J.G “La funcionalidad de los óxidos de hierro” Grupo de corrosión y Protección. Universidad de Antioquia. 1997. Pg 274-278

DOMINGO J. José. “Proceso LW.S.”. Documento Acerías Paz Del Río S.A., Belencito 1980. Pg 10-14.

GASKELL David R. “Introduction to Metallurgical Thermodynamics”. University of Pennsylvania , Philadelphia, McGRAW-HILL, 1973. Pg 253-276, Appendix A.

KINDELAN J.M. “Aspectos físico-químicos del afino del arrabio con oxígeno puro” Ciencia y Tecnología. Rev. Metal. CENIN, Vol. 1 1965. Num 2.

LEOY Pierre, SALEIL M.J. “Soplado por el fondo mediante el proceso L.W.S. para aceros al carbono y mediante el proceso C.L.U para aceros al cromo”. Sociedad Creusot-Loire. ACERIA BASICA AL OXIGENO, Instituto Latinoamericano del fierro y el Acero. Ifafa. 1976. pg 37-42.

MARGARETA A.T., "Tratamiento del acero para disminuir impurezas e inclusiones" Congreso Internacional del Hierro y el Acero, Buenos aires Argentina 2002.

RIBOUD P. "Traducción del documento: Datos termodinámicos Necesarios para el establecimiento de los Balance térmico en siderurgia". Belencito 1985. tablas 5 y 17, anexo 5.

SALAZA Pablo. "Operación y control Proceso L.W.S." Documento Acerías Paz Del Río S.A., Belencito 1981. Pg 1-7.

ULLMANN, Fritz. Enciclopedia de Química Industrial. Madrid: Eduardo Gili, 1953. Vol 7 p.100-103,156-167.

VARGAS MANTILLA, Jorge Enrique. Preparación y Evaluación de Proyectos de Inversión. Bucaramanga: Publicaciones UIS. 1987. p. 194-198, 207-209.

ANEXOS

ANEXO A. DERIVACIÓN TERMODINÁMICA DEL DIAGRAMA

Para simplificar la aplicación de la 1era y 2da ley tenemos que delimitar nuestro sistema con las siguientes restricciones:

Temperatura	Bajo control del operador
Presión	1 atm (constante)
3 Componentes en equilibrio	M (metal sólido)
	O ₂ (gas)
	M _u O _v (óxido metálico)
Sólo ocurre una reacción (invariante)	$uM + \frac{v}{2}O_2 = M_uO_v$ [9]

La ecuación a usar es la 1era y 2da ley combinada en la forma diferencial de energía libre:

$$dG'_i = V'_i dP_i - S'_i dT_i + \mu_i dn_i \quad (i = \text{fase } i)$$

Con dP_i y $dT_i = 0$: $dG'_i = \mu_i dn_i \quad (n = \text{mol})$

Aplicado al sistema resulta: $dG'_{sistema} = dG'_M + dG'_{O_2} + dG'_{M_uO_v}$, por lo tanto:

$$dG'_{sistema} = \mu_M dn_M + \mu_{O_2} dn_{O_2} + \mu_{M_uO_v} dn_{M_uO_v} \quad [10]$$

Aunque los moles de cada compuesto no se conserva debido a la reacción química, la masa atómica para cada elemento sí es constante (Ley de conservación de masa). Matemáticamente se expresa como:

$$dm_i = 0$$

Aplicando la conservación de masa atómica para cada elemento “ m_i ” resulta:

Átomos de Metal: $m_M = n_M + (u \times n_{M_uO_v})$

$$dm_M = dn_M + (u \times dn_{M_uO_v}) = 0 \quad \Rightarrow \quad dn_M = -(u \times dn_{M_uO_v})$$

Átomos de Oxígeno: $m_O = (2 \times n_{O_2}) + (v \times n_{M_uO_v})$

$$dm_O = (2 \times dn_{O_2}) + (v \times dn_{M_uO_v}) = 0 \quad \Rightarrow \quad dn_{O_2} = -\frac{v}{2} \times dn_{M_uO_v}$$

Usando estas igualdades se logra expresar dn_M y dn_{O_2} en función de $dn_{M_uO_v}$ en la ecuación [10]:

$$dG'_{sistema} = \mu_M (-u \times dn_{M_uO_v}) + \mu_{O_2} (-\frac{v}{2} \times dn_{M_uO_v}) + \mu_{M_uO_v} dn_{M_uO_v}$$

$$= \left[\mu_{M_uO_v} - (u \times \mu_M + \frac{v}{2} \times \mu_{O_2}) \right] dn_{M_uO_v} \quad [11]$$

La expresión en [14] se conoce como la AFINIDAD ("A") de la reacción:

$$A = \left[\mu_{M_uO_v} - (u \times \mu_M + \frac{v}{2} \times \mu_{O_2}) \right] \quad \text{generalizando:}$$

$$A = \sum (v \times \mu)_{\text{productos}} - \sum (v \times \mu)_{\text{reactivos}}$$

Puesto que el criterio de espontaneidad para alcanzar equilibrio (a temperatura y presión constante) es $dG'_{sistema} \leq 0$, se debe cumplir que

$$(1) \quad dG'_{sistema} = \left[\mu_{M_uO_v} - (u \times \mu_M + \frac{v}{2} \times \mu_{O_2}) \right] dn_{M_uO_v} = A \times dn_{M_uO_v} \leq 0$$

Esta desigualdad conduce a 3 posibilidades:

1	$A < 0 \Rightarrow \sum (v \times \mu)_{\text{productos}} < \sum (v \times \mu)_{\text{reactivos}}$	$dn_{M_uO_v} > 0$ (se produce óxido)
2	$A > 0 \Rightarrow \sum (v \times \mu)_{\text{productos}} > \sum (v \times \mu)_{\text{reactivos}}$	$dn_{M_uO_v} < 0$ (se consume óxido)
3	$A = 0 \Rightarrow \sum (v \times \mu)_{\text{productos}} = \sum (v \times \mu)_{\text{reactivos}}$	$dn_{M_uO_v} = 0$ (sistema en equilibrio)

En la práctica, sin embargo, no se usan valores de potencial químico sino de actividad. Este concepto ha sido creado por conveniencia matemática y se define como

$$(2) \quad a_i = \exp\left(\frac{\mu_i - \mu_i^o}{RT}\right) \quad \text{luego:} \quad \mu_i = \mu_i^o + RT \ln a_i$$

Su utilidad radica en que su valor depende del estado de referencia que se escoja para el potencial químico; es decir, depende de μ_i^o . Podemos comprobar que

$$1. \text{ Cuando } \mu_i = \mu_i^o \Rightarrow a_i = 1.$$

2. Si es un gas ideal, entonces: $a_i = p_i =$ presión parcial del gas (expresado en atmósfera) ⁽¹⁾

Puesto que el oxígeno se comporta idealmente en el rango de temperatura de interés, la afinidad se puede expresar en función de las actividades de cada componente (a_i) y p_{O_2} :

$$\begin{aligned} A &= \left[\mu_{M_uO_v} - (u \times \mu_M + \frac{v}{2} \times \mu_{O_2}) \right] \\ &= (\mu_{M_uO_v}^o + RT \ln a_{M_uO_v}) - u(\mu_M^o + RT \ln a_M) - \frac{v}{2}(\mu_{O_2}^o + RT \ln p_{O_2}) \\ &= \left[\mu_{M_uO_v}^o - (u\mu_M^o + \frac{v}{2}\mu_{O_2}^o) \right] + RT \ln \left(\frac{a_{M_uO_v}}{a_M^u \times p_{O_2}^{\frac{v}{2}}} \right) \end{aligned}$$

Note que el primer término $\left[\mu_{M_uO_v}^o - (u\mu_M^o + \frac{v}{2}\mu_{O_2}^o) \right]$ es igual a ΔG^o ; y el término entre paréntesis se conoce como el cociente de actividades "Q"; por lo tanto, la afinidad de la reacción es

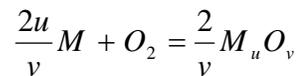
$$A = \Delta G^o + RT \ln Q$$

Cuando el sistema alcanza equilibrio, la afinidad de la reacción es cero, entonces se cumple

$$(3) \quad \Delta G^o = -RT \ln Q_{eq} = -RT \ln K$$

" Q_{eq} " es la constante de equilibrio de la reacción y suele ser designada con la letra "K".

Para construir el diagrama, Richardson y Ellingham escogieron la reacción para un mol O_2 :



Así lograron obtener una constante de equilibrio K en función de la presión de O_2 :

$$(4) \quad K = \left(\frac{a_{M_uO_v}^{\frac{2}{v}}}{a_M^{\frac{2u}{v}} \times p_{O_2}} \right) = \left(\frac{1}{1 \times p_{O_2}} \right) = \frac{1}{p_{O_2}}$$

ya que se ha observado en la práctica que las actividades de los metales puros y sus óxidos son cercanos a la unidad (1).

¹ Se puede demostrar esta igualdad a partir de la expresión $dG_T = VdP$

De la bibliografía² se obtienen valores de ΔS° y ΔH° para calcular ΔG° usando la ecuación fundamental

$$(5) \quad \Delta G^\circ = \Delta H^\circ - \Delta S^\circ T$$

la cual es la primera recta que se grafica en el diagrama de *Richardson – Ellingham* (para cada uno de los metales de interés). Note que la pendiente es $(-\Delta S^\circ)$ y el intercepto con el origen es (ΔH°) .

Al alcanzarse el equilibrio, las ecuaciones (4) y (5) pueden ser introducidas en la (3) para obtener:

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - \Delta S^\circ T = -RT \ln K = -RT \ln\left(\frac{1}{p_{O_2}}\right)_{eq} = RT \ln(p_{O_2})_{eq}$$

y la 2da recta que se grafica en el diagrama de *Richardson - Ellingham* para obtener el nomograma de $(p_{O_2})_{eq}$ es:

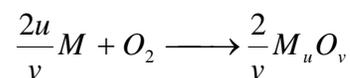
$$(6) \quad \Delta G^\circ = RT \ln(p_{O_2})_{eq}$$

por esta razón, al interceptar las rectas (5) y (6), se obtiene la temperatura y la presión parcial de oxígeno de equilibrio. Si el alumno lo desea, se puede simplificar la generación del nomograma de $(p_{O_2})_{eq}$ designando éste último como una potencia de base 10, es decir:

$(p_{O_2})_{eq} = 10^{Z_o}$, donde el exponente es Z_o , cuyo subscrito "O" indica oxígeno.

De esta forma la igualdad (6) se convierte en $\Delta G^\circ = 0.0192 \times Z_o \times T$

Como en nuestro caso se desea alcanzar el equilibrio:



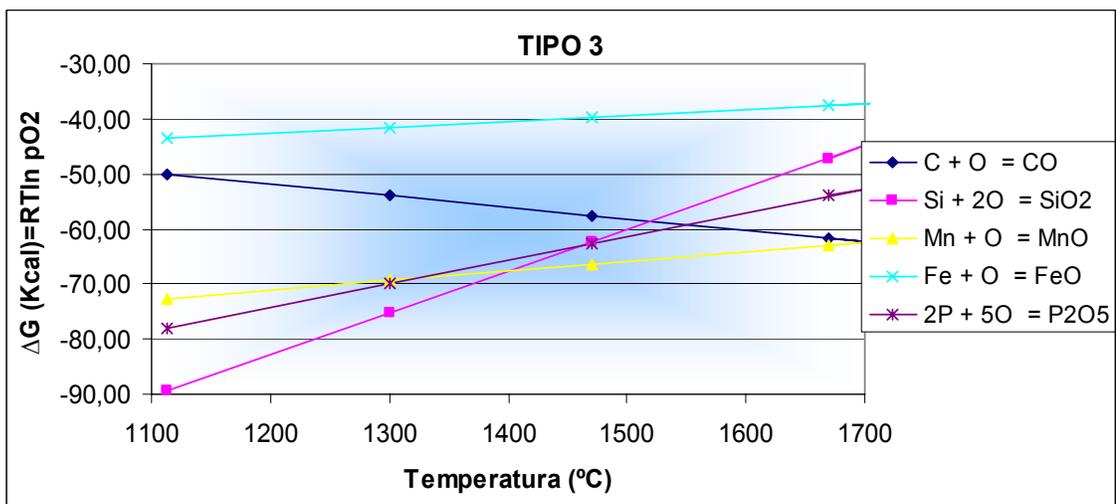
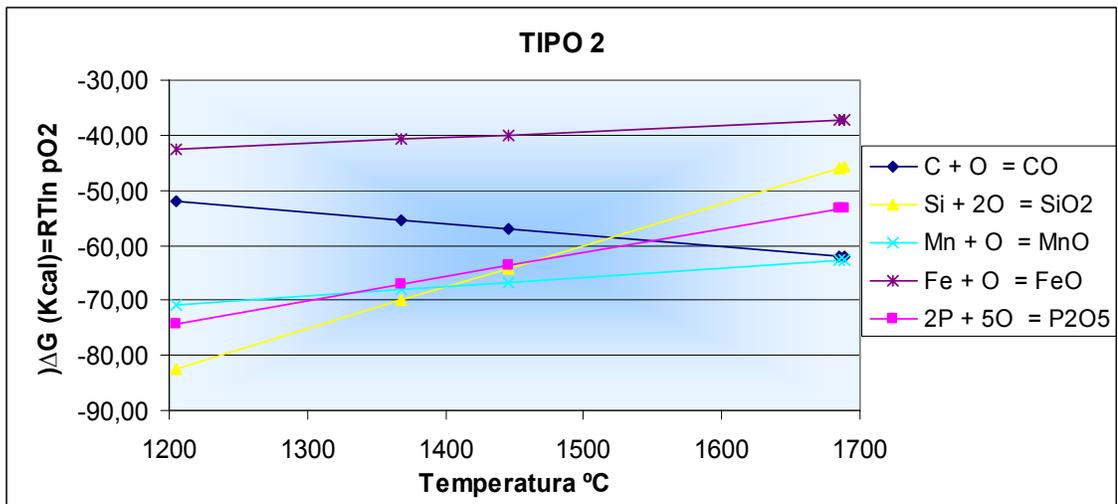
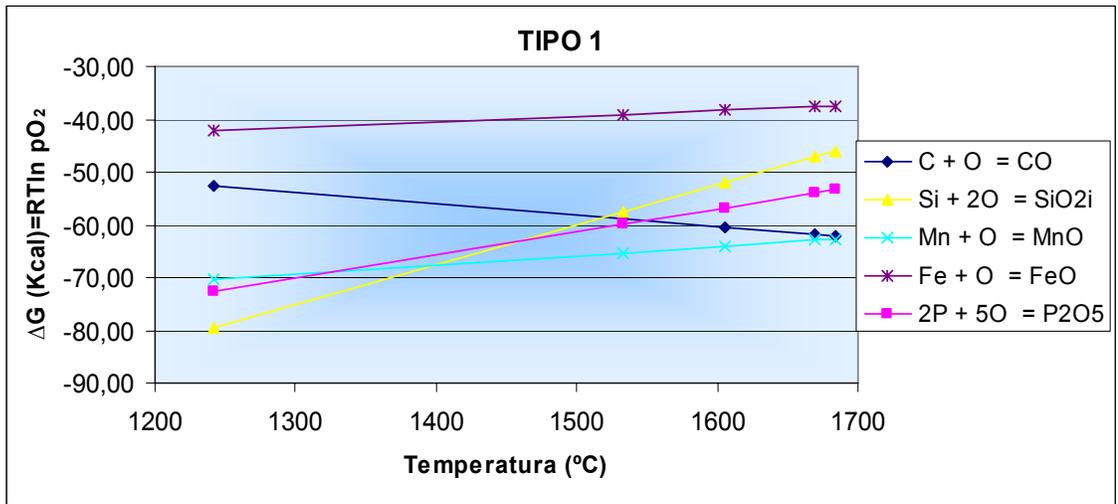
la afinidad debe ser positiva ($A < 0$) para que la cantidad de óxidos aumente ($dn_{M_u O_v} > 0$):

$$A = \Delta G^\circ + RT \ln Q < 0$$

Siendo $\Delta G^\circ = RT_{eq} \ln(p_{O_2})_{eq}$ y $Q = \left(\frac{1}{p_{O_2}}\right)_{No\ Equilibrio}$

Energía libre para los diferentes tipos de arrabios en las temperaturas trabajo del convertidor L.W.S. de Acerías Paz del Río

² Textos como el Levine y Atkins, los 2 son de fisicoquímica.

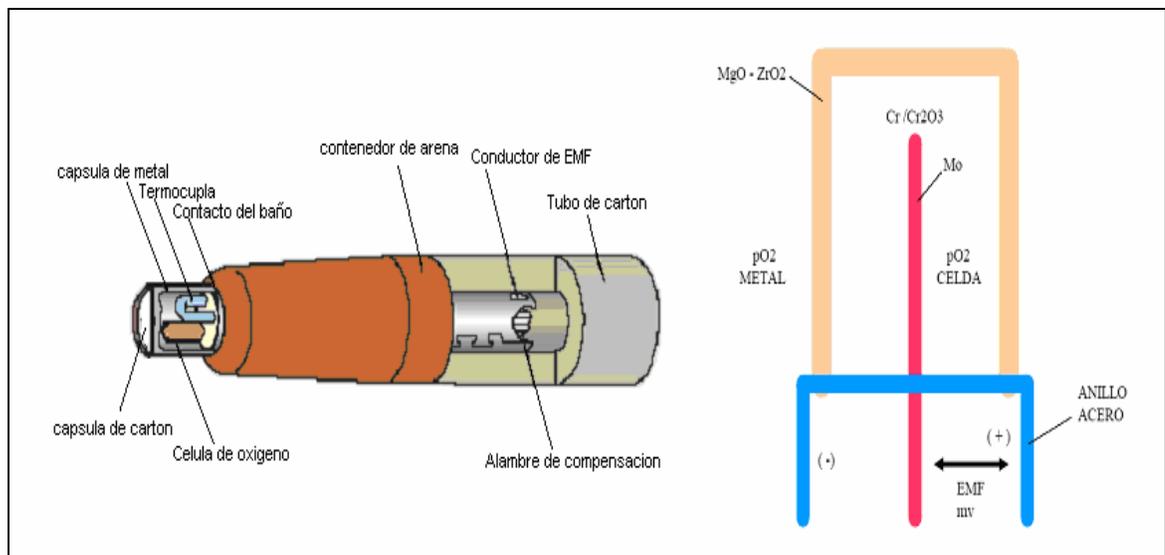


ANEXO B. MUESTREO DE OXIGENO DISUELTO EN EL BAÑO

Sensor Celox

Este sensor es especializado en la medición del oxígeno disuelto y va montado en un tubo de cartón, que se inserta en una lanza permitiendo la inmersión en el baño metálico. Además, en la cabeza se ubica un termopar común tipo 10% Pt-PtRh, que se emplea para medir la temperatura, una celda constituida por un tubo de MgO estabilizado con ZrO_2 que actúa como electrolito y un relleno de polvo de Cr/Cr_2O_3 , como se observa en la siguiente figura.

Celda celox



Fuente: Heraeus Electro-Nite Internacional y Autores

Medición de concentración del oxígeno disuelto en el baño metálico.

Por medio del equipo multilab III versión 2.1

Cuando se efectúa una medición, el elemento sensor origina dos señales, (figura Principio de la operación del Celox.), una proviene del termopar

proporcionando la temperatura, y otra en la celda electroquímica donde se genera una Fem o EMF (Fuerza Electromotriz), definida por la ley de Nernst's como:

$$EMF = RT/nF \ln (a_{O_{acero}}/a_{O_{ref}}) \quad [7]$$

EMF: Fuerza electromotriz de la celda (en mV)

R: Constante universal de los gases

T: Temperatura (en K)

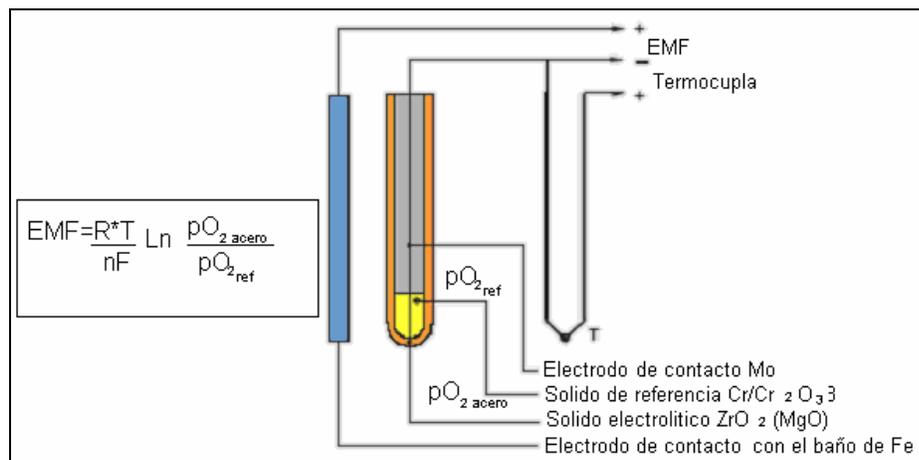
n: Numero de electrones involucrados en la reacción electroquímica.

$a_{O_{Acero}}$: actividad del oxígeno en el baño de acero

$a_{O_{Ref}}$: actividad del oxígeno en el material de referencia (Cr+Cr₂O₃)

proporcional a la diferencia de las presiones parciales de oxígeno presente en la célula de referencia y en el acero. Con base en las ecuaciones del tratamiento matemático de las señales, el computador interpreta estos datos y muestra los resultados en una pantalla.

Principio de la operación del Celox.



Fuente. Heraneus Electro-Nite Internacional y Autores

La medida de la actividad del oxígeno disuelto en el baño fundido dentro del convertidor sólo se pudo realizar en los puntos cuatro y cinco mostradas en la figura 4.

En el transcurso de la experimentación se observó, con preocupación, la falta del reporte de lectura en la concentración de oxígeno en los puntos de muestreo uno, dos y tres, una revisión bibliográfica [3, 11], y un análisis de las condiciones físicas del proceso* derivó en un seguimiento del comportamiento para la determinación de la relación carbono-oxígeno.

Esta medida requiere para su ajuste datos reales del proceso de afino. Los autores a partir del mal funcionamiento del equipo desde su adquisición hicieron un seguimiento de varias coladas para el soplo y fin de soplo. Este hecho provocó que la empresa electro nite, generara el adecuado manejo matemático de las señales, relacionando el carbono con el oxígeno reportado por el instrumento, dando la función de equilibrio entre estos dos elementos.

* Condiciones físicas referido a pastosidad del baño, chatarra sin fundir y escoria poco fluida

Seguimiento del celox

Colada	ppm de O2	% W C	Temperatura °C
36725-soplo	1077,33	0,03	1676
36725-fin soplo	209,719	0,062	1582
36726-soplo	1373,99	0,03	1696
36726-fin soplo	319,728	0,036	1618
36727-soplo	1234,8	0,03	1695
36727-fin soplo	301,13	0,05	1610
36728-soplo	998,23	0,03	1693
36728-fin soplo	127,28	0,09	1602
36729-soplo	1052,8	0,03	1699
36729-fin soplo	248,75	0,05	1608
36730-soplo	968,67	0,03	1691
36730-fin soplo	199,81	0,068	1610
36731-soplo	879,53	0,003	1684
36731-fin soplo	251,76	0,06	1604
36732-soplo	936,75	0,03	1684

Fuente. Autores

Proceso matemático de las señales. El multilab procesa los milivoltajes provenientes del termopar de la celda y los aplica a la siguiente ecuación que esta en función de:

$$\text{Log } \alpha_o = 1,36 + (0,0059)*\{e + (0,54)*(T - 1550) + (0,0002)*(e) (T - 1550)\}$$

e = EMF celda (mv)

T = Temperatura determinada por termopar (°C)

α_o = actividad del contenido de O₂ (ppm)

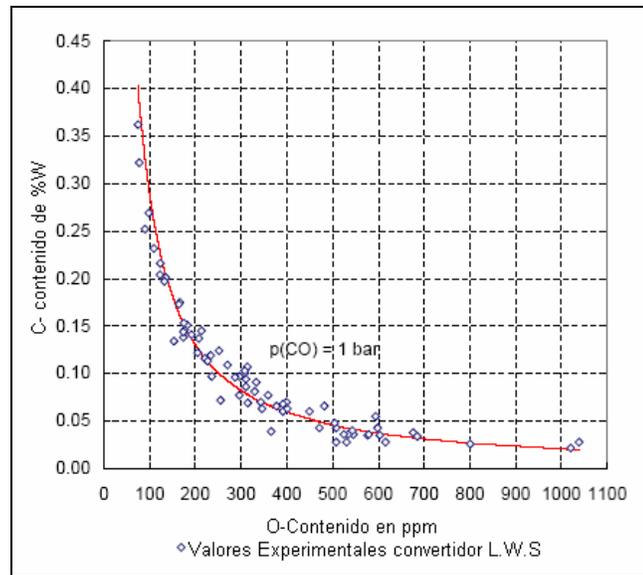
Esta medida aprovecha la medición de la fuerza electromotriz química, y la emplea en la ecuación de Nerst a una solución electrolítica como lo es el baño metálico. Donde el potencial se encuentra relacionado con el

contenido activo del oxígeno en el acero, dando como resultado la actividad del oxígeno en ppm.

Entonces si la actividad del oxígeno (α_o en ppm) cae en la zona de mayor concentración de oxígeno el computador aplica la siguiente ecuación y da como resultado el porcentaje de carbono presente.

$$\text{Log \%C} = 2,236 - \text{Log } \alpha_o - (1303 / T)$$

Relación C-O dentro del convertidor



Fuente. Heraeus Electro-Nite Internacionales en colaboración con los autores

ANEXOS C

MARCHAS QUIMICAS

ANEXO D. Análisis químicos.

ANÁLISIS QUIMICO DE LA CAL

Los resultados de los análisis químicos de los diferentes tipos de cal reportados por el laboratorio para la primera fase de los diferentes tipos de cal se muestran a en la siguiente tabla.

Resultados de los análisis de composición química para los diferentes tipos de cal previa a las coladas muestreadas en la primera fase experimental.

POLVO PARA SOPLO	Nº de Colada	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%Fe ₂ O ₃	%PPC	Reactividad en ml de HCl
Tipo 1	27042	3,49	1,18	89,59		1,43	1,35	325
	27149	3,27	2,16	90,95		1,16	2,05	370
	27339	3,75	0,71	88,16	0,73	1,41	4,24	
Tipo 2	36603	3,61	1,06	86,55		1,27	5,09	
	37050	3,45	1,12	90,2		0,62	1,93	350
	37214	3,75	1,42	86,7	0,62	1,12	5,68	335
Tipo 3	27365	3,48	0,95	89,28		1,61	2,68	350

ROCA PARA BARRER A	Nº de Colada	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%Fe ₂ O ₃	%PPC	Reactividad en ml de HCl
Tipo 1	27042	2,5	0,65	92,3		1,05	1,05	380
	27149	3,51	1,02	91,3		0,5	2,01	380
	27339	4,28	0,95	87,15	0,75	1,52	4,15	294
Tipo 2	36603	2,67	1,06	87,8		1,18	4,85	216
	37050	4,2	1,5	88,5		0,4	2,2	290
	37214	2,94	1,18	87,71	0,68	0,84	5,95	343
Tipo 3	27365	3,48	1,18	89,23		1,61	3	348

ROCA PARA SOPLO	Nº de Colada	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%Fe ₂ O ₃	PPC	Reactividad
Tipo 1	27042	3,29	0,95	86,17		1,12	7,23	150
	27149	3,79	1,19	87,3		0,55	5,11	260
	27339	2,94	0,83	76,98	0,62	1,09	16,65	114
Tipo 2	36603	3,21	1,18	85,94		1,3	6,05	327
	37050	3,56	1,25	88		0,58	5,5	260
	37214	2,94	0,95	78,59	0,5	0,91	15,41	116
Tipo 3	27365	3,34	0,95	83,18		1,25	9,28	218

Fuente. Autores

MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA.

Los datos reportados por el termopar puntos 1, 2, 3 y los adquiridos con la celda celox puntos 4 y 5 se observan en la siguiente tabla.

Reporte de temperatura para los diferentes puntos durante la primera fase experimental

	N° de Colada	Temperatura °C				
		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
Tipo 1	27042	1236		1605	1622	1641
	27149	1211	1530	1603	1635	1684
	27339	1280	1530	1608	1638	1665
Tipo 2	36603	1220	1380	1415	1661	1670
	37050	1208	1361	1452	1724	1703
	37214	1188	1364	1470	1682	1683
Tipo 3	27365	1113	1300	1470	1705	1670

MUESTREO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ELEMENTOS PRESENTES EN EL ACERO EN BRUTO.

El seguimiento experimental efectuado a las composiciones químicas de los elementos presentes en el baño metálico se muestran en la siguiente tabla.

Composición Química de los elementos del baño metálico dentro del convertidor en los puntos de muestra de la primera fase experimental.

PUNTO UNO	Nº de Colada	%C	%Mn	%P	%S	%Si
tipo 1	27042	3,09	0,217	2,28	0,0924	0,984
	27149	3,01	0,0246	2,3	0,047	0,67
	27339	3,1	0,245	2,3	0,068	0,74
Tipo 2	36603	3,41	0,69	2,29	0,69	1,16
	37050	3,07	0,23	2,29	0,059	1,01
	37214	3,408	0,264	2,29	0,05	1,092
Tipo 3	27365	3,336	0,295	2,92	0,054	1,461
PUNTO DOS	Nº de Colada	%C	%Mn	%P	%S	%Si
tipo 1	27042	1,53	0,1	1,36	0,08	0,5
	27149	0,3	0,042	1,7	0,37	0,42
	27339	1,75	0,2	0,57	0,078	0,1
Tipo 2	36603	2,21	0,56	2,05	0,53	0,086
	37050	1,88	0,1	2,296	0,06	0,05
	37214	1,47	0,1	2,29	0,04	0,5
Tipo 3	27365	0,087	0,092	0,12	0,058	0,002
PUNTO TRES	Nº de Colada	%C	%Mn	%P	%S	%Si
tipo 1	27042	0,05	0,045	0,4	0,052	0,047
	27149	0,053	0,03	0,078	0,028	0,2
	27339	0,64	0,2	0,54	0,077	0,1
Tipo 2	36603	0,46	0,36	1,02	0,1	0,004
	37050	0,3	0,11	0,537	0,067	0,04
	37214	0,48	0,18	0,12	0,12	0,03
Tipo 3	27365	0,03	0,067	0,057	0,02	0,002
SOPLO						
PUNTO CUATRO	Nº de Colada	%C	%Mn	%P	%S	%Si
Tipo 1	27042	0,032	0,032	0,083	0,035	0,031
	27149	0,03	0,026	0,032	0,025	0
	27339	0,03	0,123	0,123	0,048	0
Tipo 2	36603	0,05	0,035	0,5	0,06	0,003
	37050	0,03	0,08	0,095	0,044	0,01
	37214	0,03	0,05	0,035	0,028	0
Tipo 3	27365	0,03	0,024	0,02	0,012	0,003
SOBRE SOPLO						
PUNTO CINCO	Nº de Colada	%C	%Mn	%P	%S	%Si
Tipo 1	27042	0,03	0,03	0,025	0,029	0,002
	27149	0,027	0,02	0,025	0,02	0
	27339	0,03	0,057	0,034	0,031	0
Tipo 2	36603	0,03	0,02	0,021	0,02	0
	37050	0,03	0,04	0,036	0,026	0
	37214	0,03	0,03	0,03	0,029	0
Tipo 3	27365	0,03	0,021	0,018	0,013	0,002

Fuente. Autores