OPTIMIZACIÓN DE PRÁCTICAS OPERATIVAS DEL HORNO CUCHARA DE ACERÍAS PAZ DEL RÍO S.A

ANGÉLICA DANIELA BAUTISTA TORRES

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA
TUNJA
2019

OPTIMIZACIÓN DE PRÁCTICAS OPERATIVAS DEL HORNO CUCHARA DE ACERÍAS PAZ DEL RÍO S.A

ANGÉLICA DANIELA BAUTISTA TORRES

Trabajo de grado como requisito para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director:
Fabio Raúl Pérez Villamil
Ingeniero Metalúrgico, Maestría en Metalurgia y Ciencia de los Materiales

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA
TUNJA
2019

Nota de aceptación:

_____
_____
_____
_____
_____

_____
Presidente del jurado

_____
Firma del jurado

_____
Firma del jurado

Tunja, 22 de marzo 2019

DEDICATORIA

Porque todas las cosas proceden de Él,
y existen por Él y para Él.
¡A Él sea la gloria por siempre! Amén.
Romanos 11:36

A mis padres Raúl y Gloria, mi abuela Edelmira, mis hermanos Brayan, Laura y Andrés por su amor incondicional, su apoyo, por ser el motor de mi vida, el motivo de mis alegrías y la razón para luchar todos los días de mi vida.

A mi compañero de vida, Daniel Fernando, por su paciencia, apoyo y amor.

Los amo con todo el corazón

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su apoyo desmedido durante el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, la Escuela de Ingeniería Metalúrgica por todos los conocimientos compartidos y las experiencias vividas. Al ingeniero Fabio Raúl Pérez Villamil por ser mi director de proyecto.

A mis compañeros de universidad por su compañía, amistad, paciencia en este largo camino que recorrimos juntos.

A la compañía Acerías Paz del Rio S.A por permitirme ampliar y afianzar mis conocimientos.

Al equipo de trabajo del horno cuchara y máquina de colada continua por su disposición y ayuda para el desarrollo de este proyecto.

A los ingenieros Eduardo Franco, Gustavo García, William Viancha por compartir sus conocimientos y por su ayuda.

En general, a todo el equipo de trabajo de la división aceración por hacer de mi estadía una experiencia inolvidable.

CONTENIDO

RESUMEN 12
INTRODUCCIÓN 13
2. MARCO REFERENCIAL 14
2.1 PROCESO SIDERÚRGICO 14
2.2 PROCESO ALTO HORNO 15
2.3 PROCESO CONVERTIDORES 16
2.4 PROCESO HORNO ELÉCTRICO DE ARCO 17
2.5 PROCESO HORNO CUCHARA 17
2.5 ESCORIA EN EL HORNO CUCHARA 20
2.5.1 Influencia de la escoria en la desoxidación del acero 22
2.5.2 Características físicas de la escoria: 22
2.6 DESOXIDACIÓN DEL ACERO 23
2.7 DESULFURACIÓN DEL ACERO 25
2.7.1 Reacción de desulfuración y capacidad de sulfuro 25
2.7.2 Actividad de oxígeno 27
2.7.3 Temperatura 28
2.7.4 Basicidad óptica 28
2.8 AGITACION DEL ACERO LÍQUIDO 29
2.8.1 Agitación electromagnética inducida 30
2.8.2 Agitación por burbujeamiento de gases inertes 30
2.9 ADICIÓN DE ALEANTES EN HORNO CUCHARA 32
2.9.1 Disolución de las aleaciones en el baño. 33
2.9.2 Inyección de aleaciones en alambres 35
2.10 LIMPIEZA DEL ACERO 35
2.10.1 Control de la morfología de los sulfuros. 37
2.10.2 Control de la morfología de óxidos. 37
2.11 CUIDADOS POSTERIORES AL TRATAMIENTO DEL ACERO 39
2.11 PROCESO MAQUINA DE COLADA CONTINUA 40
2.12 CUCHARAS DE ACERO LÍQUIDO 41

2.12.1 Tapón poroso.....42
3. ESTADO DEL ARTE.....44
4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....46
4.1 METODOLOGÍA.....46
4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL.....47
5. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....48
5.1 ETAPA 1: RECOPILACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....48
5.1.1 Equipo.....48
5.1.2 Proceso......49
5.2 ETAPA 2: MEDICIÓN Y SEGUIMIENTO AL TIEMPO DE PROCESAMIENTO DE COLADAS Y ETAPA 3: ACOMPAÑAMIENTO AL PROCESO EN EL HORNO CUCHARA.....51
5.2.1 Instalación del Indicador.....51
5.2.2 Seguimiento mes a mes.....52
5.2.3 Acompañamiento al horno cuchara.....62
5.2.4 Acciones generadas......64
5.4 ETAPA 4: ACTUALIZACIÓN DE GUÍAS DE OPERACIÓN.....68
5.4.1 Procesamiento de coladas......68
5.4.2 Cálculo y adición de ferroaleaciones......68
5.4.3 Empalme y alargue de electrodos.....68
6. RESULTADOS OBTENIDOS.....69
6.1 TIEMPOS DE PROCESAMIENTO DE LAS COLADAS.....69
6.2 AGITACIÓN METALÚRGICA EN CUCHARA.....70
6.3 CALENTAMIENTO DE FERROALEACIONES.....71
6.4 CONFORMIDAD QUÍMICA DE LA PALANQUILLA.....73
6.5 COLADAS CON FOSFORO MAYOR.....74
7. CONCLUSIONES.....76
8. OPORTUNIDADES DE MEJORA.....77
BIBLIOGRAFIA.....78
ANEXOS.....79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo proceso siderúrgico Acerías Paz del Rio 14
Figura 2. Esquema de un alto horno 15
Figura 3. Esquema horno cuchara 18
Figura 4. Adiciones en cuchara 19
Figura 5. Diagrama ternario Al2O3-CaO-SiO2 21
Figura 6. Diagrama ternario CaO-CaF2-SiO2 21
Figura 7. Equilibrio a 1.600 °C entre elementos de aleación y el oxígeno en el hierro líquido 24
Figura 8. Líneas de flujo del acero líquido con agitación electromagnética 30
Figura 9. Inyección de gases por tapón poroso en el centro de la cuchara 31
Figura 10. Adición de aleaciones sólidas usando agitación por gases y electromagnética 32
Figura 11. Idealización del proceso de absorción de aleantes para el acero líquido. Ruta 1: aleantes clase I. Ruta 2: aleantes clase II 34
Figura 12. Tiempo de disolución de aleaciones Clase I y Clase II 34
Figura 13. Corte transversal de un alambre “relleno” de aleación 35
Figura 14. Inclusiones presentes en el acero lingoteado y laminado. 36
Figura 15. Diagrama de fases Al2O3-CaO 38
Figura 16. Esquema máquina de colada continua 41
Figura 17. Diseño de cuchara de acero líquido 42
Figura 18. Conjunto de tapón poroso en el fondo de la cuchara 43
Figura 19. Formas estándar de tapones isotrópicos: (a) y (b). Componentes del tapón: corte (e), concéntrico (d). Tapones capilares: cónico (e), regular (f) 43
Figura 20. Guía de capacitación agitación metalúrgica 65
Figura 21. Calentamiento de ferroaleaciones 66
Figura 22. Recopilación de las lecciones aprendidas de las coladas con desvíos de composición química 67
Figura 23. Horno cuchara Acerías Paz del Río S.A 79
Figura 24. Plataforma de trabajo horno cuchara Acerías Paz del Río S.A 79
Figura 25. Ferroaleaciones. Lado derecho ferrosilicomanganeso. Lado derecho ferrosilicio 80
Figura 26. Cuchara para transporte de acero liquido 80
Figura 27. Mecanismo de tapón poroso para cucharas de acero líquido 81
Figura 28. Actividad de empalme de electrodos 81
Figura 29. Adición de ferroaleaciones 82
Figura 30. Toma de temperatura 82

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Basicidad óptica de algunos óxidos 29
Tabla 2. Cuidados posteriores al tratamiento do acero líquido 39
Tabla 3. Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara junio 2018 52
Tabla 4.Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara julio 2018 53
Tabla 5. Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara agosto 2018 ..55
Tabla 6. Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara septiembre 2018.....56
Tabla 7. Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara octubre 2018 .58
Tabla 9. Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara noviembre 2018 59
Tabla 9. Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara diciembre 2018 61

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Causas desviación TTT junio 2018 53
Gráfica 2. Causas desviación TTT julio 2018.....54
Gráfica 3. Causas desviación TTT agosto 2018 56
Gráfica 4. Causas desviación TTT septiembre 2018 57
Gráfica 5. Causas desviación TTT octubre 2018.....59
Gráfica 6. Causas desviación TTT noviembre 2018 60
Gráfica 7. Causas desviación TTT diciembre 2018 62
Gráfica 8. Tiempos inciales Power ON/TTT.....63
Gráfica 9. Comportamiento en la generación de producto no conforme.....64
Gráfica 10. Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara Jun-Dic 2018 69
Gráfica 11. Resultados número de no agitaciones de cucharas.....71
Gráfica 12. Comparación de temperaturas de colado.....72
Gráfica 13. Comparación tiempos TTT/Power ON.....72
Gráfica 14. Generación de producto no conforme acería jun-dic 2018.....73
Gráfica 15. Generación de coladas con fósforo mayor.....74
Gráfica 16. Resultados chatarra coladas fósforo mayor 75

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Registro fotográfico horno cuchara Acerías Paz del Río S.A 79
Anexo B. Registro fotografico materias y equipos de horno cuchara Acerías Paz del Río S.A.....80
Anexo C. Registro fotográfico actividades realizadas en el horno cuchara Acerías Paz del Río S.A.....81
Anexo D. Hoja de cálculo de adiciones en horno cuchara Acerías Paz del Río S.A 83
Anexo E. Formato Guía de operación Acerías Paz del Rio S.A.....83

RESUMEN

Este trabajo presenta información sobre las oportunidades de mejora encontradas en el desarrollo de las prácticas operativas del horno cuchara de Acerías Paz del Río, con el fin de mejorar la producción y la calidad del acero que se fabrica en la compañía.

Para el desarrollo de este proyecto se recolectó la información y se realizó acompañamiento al proceso operativo del horno cuchara, se diseñó un indicador de proceso para medir y hacer seguimiento a los tiempos de procesamiento de coladas. En esta fase se encontró que los tiempos de procesamiento de las coladas en su mayoría se ven afectados por agentes externos, es decir, los procesos anteriores al horno cuchara (horno eléctrico y convertidores); a su vez, se encontraron algunas posibilidades de mejoramiento en variables como la agitación metalúrgica en cuchara vía tapón poroso, las bajas temperaturas de colado en convertidores que influyen en el tiempo de arco necesario para calentar el acero líquido hasta la temperatura optima de colado en la máquina de colada continua, los altos índices de composición química fuera de especificación interna de la compañía y la generación de chatarra por esta misma condición.

De igual manera se actualizaron de acuerdo a las necesidades del proceso guías de operación de actividades críticas como el procesamiento de las coladas, el empalme y alargue de electrodos, cálculo y adición de ferroaleaciones y la elaboración de un estándar para el tratamiento de las coladas con carbono y fósforo mayor que generan altos tiempos de parada del proceso de la acería. Todos los estándares se realizaron en conjunto con los operadores del horno cuchara y fueron capacitados en las tareas ya mencionadas.

INTRODUCCIÓN

Para una compañía es indispensable establecer indicadores para medir las condiciones de su proceso y poder llevar un control sobre estos; esto permite proponer medidas para mejorar el proceso enfocadas en cumplir las especificaciones de calidad del producto, las metas de producción y tener bajos costos de transformación de las materias primas.

En la división de aceración de Acerías Paz del Río es de vital importancia en materia de proceso el cumplimiento de la producción de palanquilla con los requerimientos necesarios para laminar producto terminado.

El ritmo de producción de una acería que produce acero vía convertidores y vía horno eléctrico en condiciones normales se controla desde el horno cuchara. Además, en el horno cuchara se le da el último tratamiento al acero líquido y los ajustes necesarios para obtener un acero de buena calidad. El complejo de operaciones y prácticas del horno cuchara permite algunas desviaciones metalúrgicas que inciden en la calidad del acero y que afectan el proceso productivo de la planta.

Para la identificación de estas desviaciones fue importante el acompañamiento al proceso y el apoyo de las herramientas estadísticas para medir y analizar el impacto y la periodicidad de estas. Esto permitió detectar y corregir prácticas operativas, proponer oportunidades de mejora y realizar actividades encaminadas a optimizar el proceso.

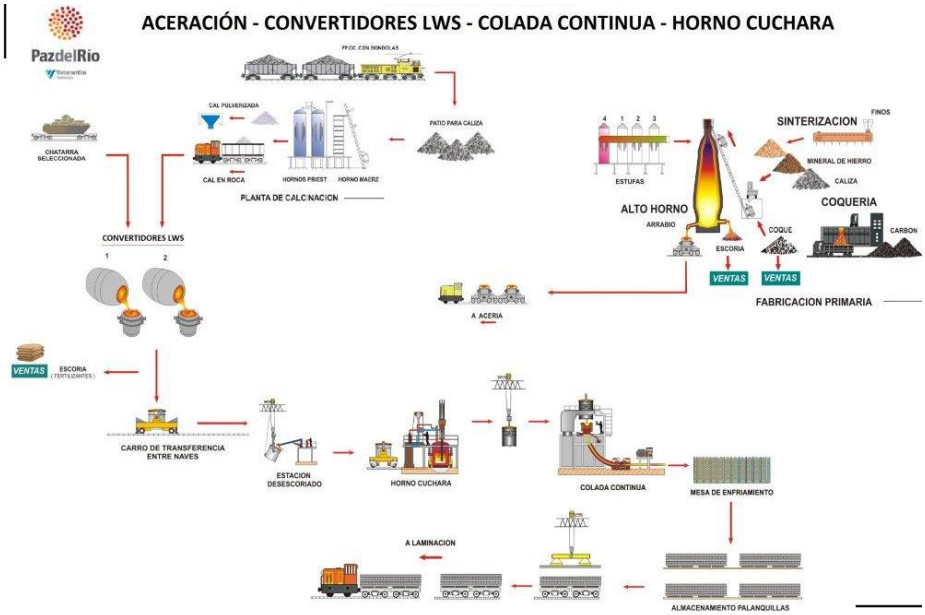
2. MARCO REFERENCIAL

2.1 PROCESO SIDERÚRGICO

Acerías Paz del Río es una empresa siderúrgica cuya operación es integrada, la obtención del acero es a partir del procesamiento en un alto horno donde se someten los minerales a altas temperaturas en un ambiente reductor para obtener arrabio o hierro fundido de primera fusión con composición química variada. El arrabio líquido es transportado hacia unos reactores denominados convertidores, allí se inyecta oxígeno para eliminar las impurezas y se obtiene acero líquido a una temperatura entre 1530-1550°C. La otra forma de producción de acero líquido es en un horno eléctrico de arco por fusión de chatarra metálica y este proceso se denomina siderurgia semi-integrada.

El acero líquido producido por estas dos formas pasa a un proceso de afino secundario en un horno cuchara donde se realiza un ajuste de composición química y temperatura óptima para un posterior colado en máquina de colada continua para obtener palanquilla que es transformada por trenes de laminación en barras, alambrón y rollos. El flujo del proceso de Acerías Paz del Rio se puede ver en la figura 1.

Figura 1. Diagrama de flujo proceso siderúrgico Acerías Paz del Rio

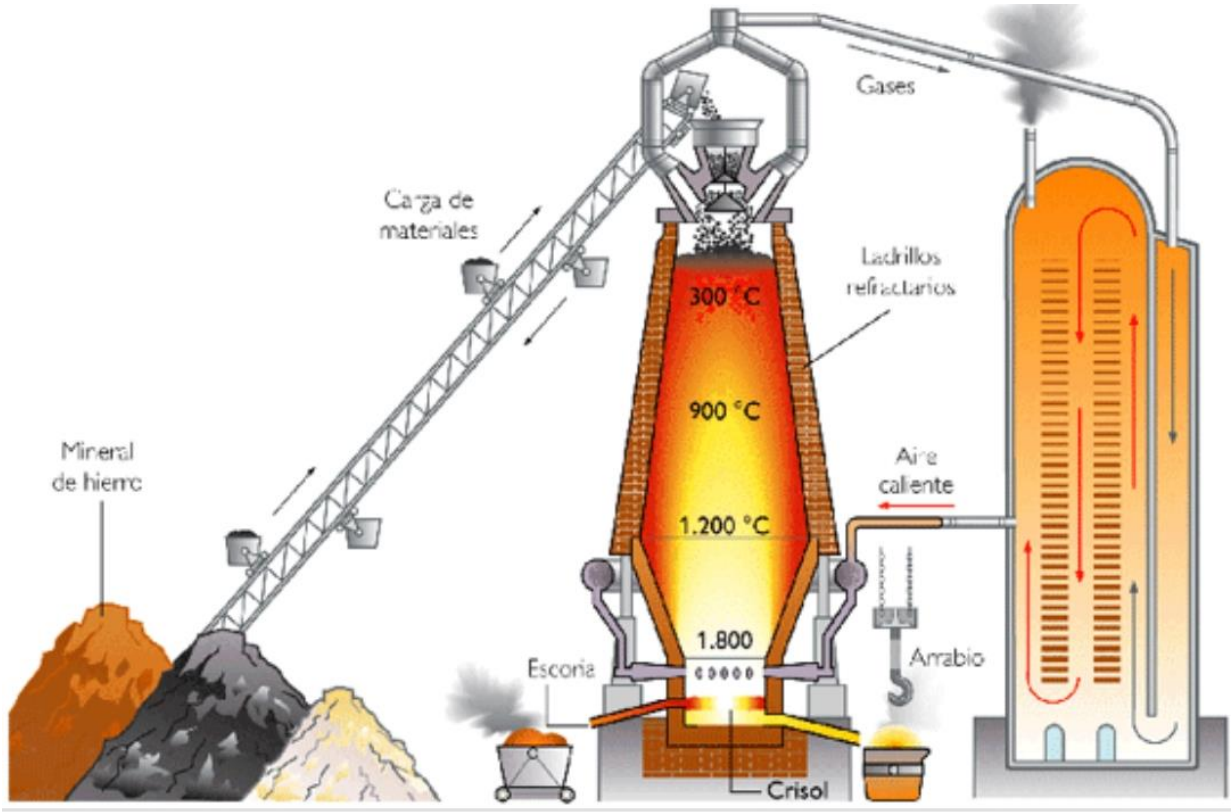


Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

2.2 PROCESO ALTO HORNO

El alto horno es un horno de cuba, formado por dos troncos de cono unidos por sus bases mayores. El tronco superior recibe el nombre de cuba y el inferior de etalaje, la zona intermedia se llama vientre. La parte interior del horno está recubierta por material refractario y la exterior es de chapa de acero, entre ambas capas se dispone un circuito de refrigeración como se observa en la figura 2. El horno es alimentado mediante una skips con minerales de hierro, sinter, coque, chatarra y algunas veces caliza.

Figura 2. Esquema de un alto horno



Fuente: XUNTA. [En línea]. [Consultado 02 de febrero de 2019]. Disponible en: https://www.edu.xunta.es/espazoAbalar/files/datos/1464947174/contido/422_horno_alto.htlm

En la planta se produce coque metalúrgico a través de una batería de coque sometiendo el carbón a una temperatura de 1200 a 1250ºC. Durante este proceso se separa el material volátil del carbón que es usado para producir subproductos como brea, naftalina, sulfato de amonio, alquitrán, etc. La función del coque es de combustible, este aporta el calor necesario para la fusión de la escoria y del metal; a su vez, actúa como soporte de la carga y es el responsable de la permeabilidad de la misma, dada su gran porosidad.

El sinter es una mezcla de finos de mineral de hierro, finos de caliza, laminilla, coquecillo y finos de retorno (depurador horno eléctrico, convertidores y horno cuchara). El proceso consiste en someter esta mezcla a una fusión incipiente de las paredes a una temperatura alrededor de los 1250ºC. Este producto se tritura y pasa por cribas para quedar a una granulometría mayor a 10mm.

Las materias primas son cargadas al Alto Horno por la parte superior y por la parte inferior inyectado aire caliente por las toberas, este aire calentado por estufas reacciona con el coque produciendo gases calientes de CO a temperaturas alrededor de los 1800°C, el CO reacciona con el mineral y el sinter ocurriendo reacciones de reducción del hierro se obtiene el arrabio (1) y se forma escoria (2). Por diferencia de densidades el arrabio es separado de la escoria. El arrabio es colado en cucharas y transportado a la acería para su conversión en acero líquido y la escoria se vende para la fabricación de cementos.

$$Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe \quad (1)$$

$$nSiO_2 + CaO \rightarrow nSiO_2.CaO \quad (2)$$

2.3 PROCESO CONVERTIDORES

El arrabio líquido que llega al área de convertidores es cargado a un reactor químico llamado convertidor para transformarlo en acero mediante la inyección combinada de oxígeno por el fondo y cal en polvo con el fin de eliminar las impurezas (Si, C, Mn, P y S). Estas impurezas son evacuadas en la escoria, el acero obtenido es colado en cucharas revestidas de refractario, durante el colado se hace una homogenización del material mediante la inyección de gas inerte a través de un tapón poroso y son adicionadas ferroaleaciones como ferrosilicomanganeso, ferrosilicio y coquecillo para dar un ajuste inicial de composición química dependiendo de la calidad de acero que se desee fabricar.

La temperatura del acero en cuchara después del colado esta entre los 1520-1550°C. Este acero es transportado al horno cuchara con grúa hasta el carro entre naves que llega al horno cuchara por vía férrea.

2.4 PROCESO HORNO ELÉCTRICO DE ARCO

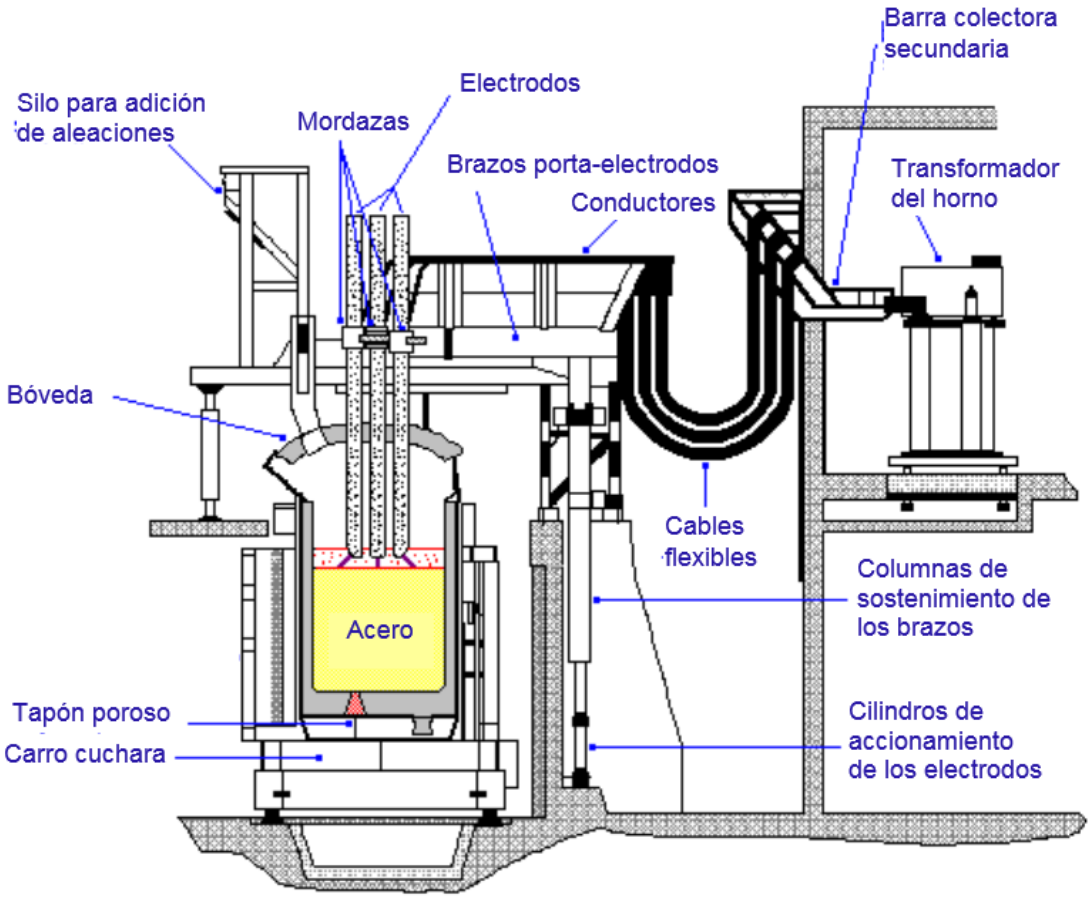
La materia prima para la producción de acero es chatarra, esta puede ser fragmentada, chatarra especial o chatarra interna. La chatarra se carga en cestas cuyo peso y número de cargues depende del volumen que ocupe esta en cada cargue. Mientras se realiza la fusión de la chatarra se hace cargue de cal y una posterior inyección de oxígeno para eliminar las impurezas del acero mediante la formación de una escoria que es evacuada para no afectar la calidad del acero. Una vez se alcanza una temperatura entre los 1650-1700°C se hace el colado del acero en cuchara y se adicionan ferroaleaciones para el ajuste inicial de composición química. Posteriormente el acero líquido es transportado por puente grúa al carro entre naves hasta el horno cuchara.

2.5 PROCESO HORNO CUCHARA

Un horno cuchara (figura 2) es un reactor conformado por la cuchara de acero líquido y una tapa donde están los electrodos, este equipo tiene como objetivo ajustar y homogenizar la temperatura y la composición química del acero. El reactor básico es un horno de arco trifásico, donde tres electrodos de grafito forman arco en la superficie del acero que transfiere la energía necesaria para el calentamiento del baño, la velocidad de calentamiento varía entre los 2 a 6ºC/min. Para el ajuste de composición química se adicionan ferroaleantes por la puerta de trabajo de la tapa o bóveda de paneles refrigerados, esta también permite la toma manual de muestras y temperaturas. Estos aditivos pueden ser ferroaleaciones con aporte de silicio, manganeso, boro, vanadio, niobio o calcio (inyección de alambre) según las necesidades de la calidad de acero que se está produciendo. El tratamiento del acero requiere un adecuado tratamiento de escoria. La homogenización de temperatura y composición química se realiza por agitación metalúrgica con gas inerte (argón).

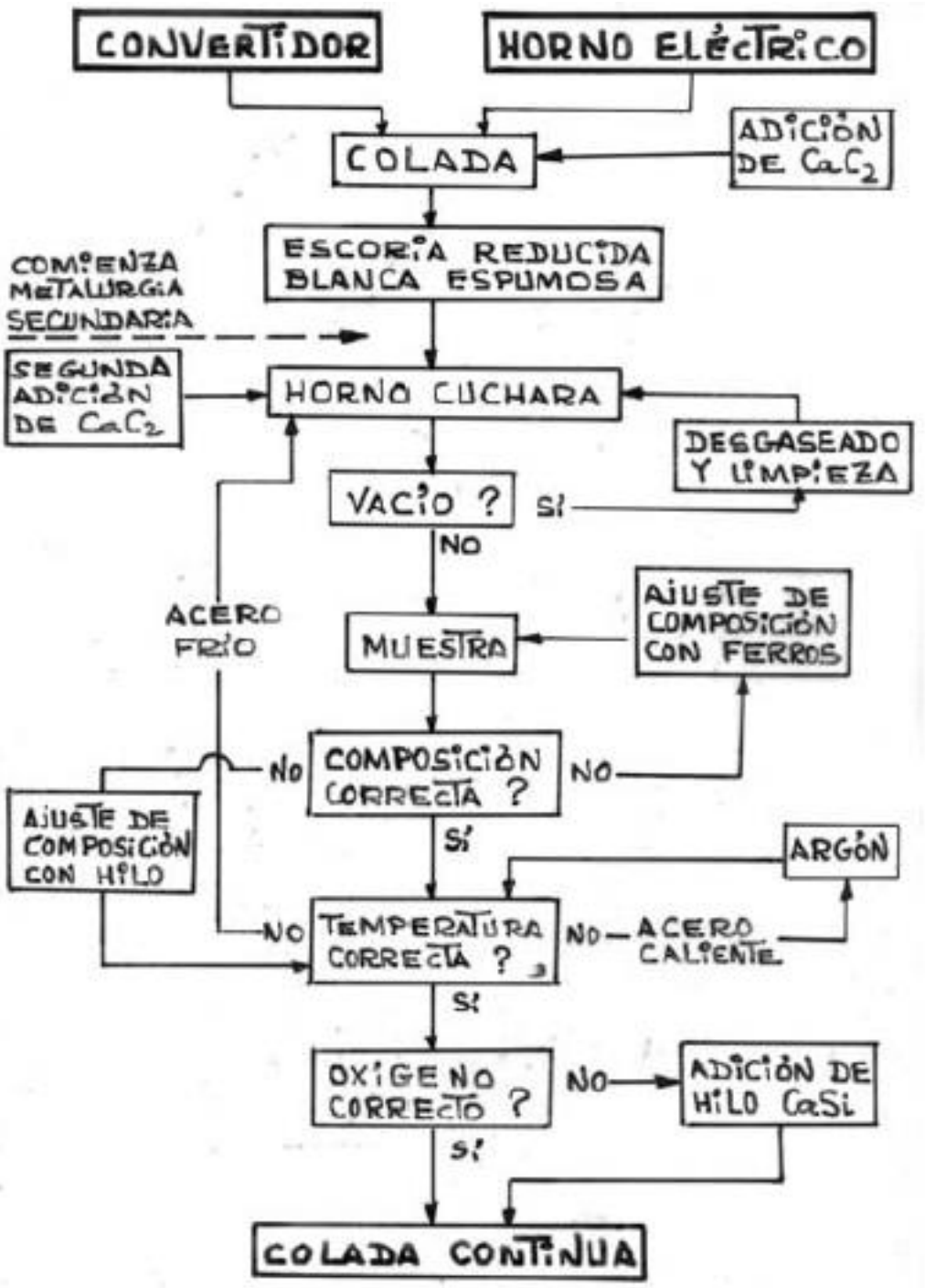
El horno cuchara (figura 3) permite obtener acero limpio con el menor número de inclusiones para la colada continua. En la figura 4 se encuentra el diagrama de flujo de adiciones en el horno cuchara.

Figura 3. Esquema horno cuchara



Fuente: BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 110

Figura 4. Adiciones en cuchara



Fuente: ENRIQUEZ BERCIANO, José Luis; TREMPS GUERRA, Enrique. Monografías sobre tecnología del acero. Parte II. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Nov 2007. Pág. 124

2.5 ESCORIA EN EL HORNO CUCHARA

Las escorias para el refino de acero líquido en cuchara deben cumplir uno o más de los siguientes objetivos:

- Protección del acero líquido: evitando su contacto con la atmosfera, y consecuentemente, la absorción de gases como hidrógeno, nitrógeno y principalmente oxígeno (prevención de reoxidación).
- Minimizar las pérdidas térmicas, haciendo controlable la pérdida de la temperatura a la que está expuesto el acero.
- Incorporación de elementos indeseables a cierto tipo de aceros, especialmente el azufre y en algunas situaciones el fosforo.
- Captación de inclusiones metálicas y no metálicas.
- Impedir la exposición del arco eléctrico durante el calentamiento en el horno cuchara, reduciendo el desgaste del refractario de la cuchara y la bóveda.

Para que una escoria pueda desempeñar bien las tareas y cumplir con los anteriores objetivos es necesario diseñarla con un conjunto de características como capacidad de azufre, capacidad de fosforo e índice de basicidad y prever su desarrollo durante las fases del tratamiento del acero líquido.

En líneas generales, las escorias pueden ser material en roca o mezclas sintéticas y tener como base Al_2O_3-CaO-SiO_2, con predominio de silicatos de calcio o aluminatos de calcio o incluso CaO-CaF_2. Los diagramas ternarios mostrados en la figura 5 y 6, indican las regiones (A/S) de composiciones normalmente empleadas para la formación de escorias sintéticas.

La elección de composición a ser utilizada va a depender del tipo de acero en fabricación, especialmente de la calidad exigida y la desoxidación, del objetivo del tratamiento, del tipo de revestimiento del refractario de la cuchara, así como de las características inherentes de la propia escoria: viscosidad, temperatura de liquidus, presencia de óxidos fuente de oxígeno, agresividad al refractario de la cuchara, etc.[1]

[11] BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 168-169

Figura 5. Diagrama ternario Al2O3-CaO-SiO2

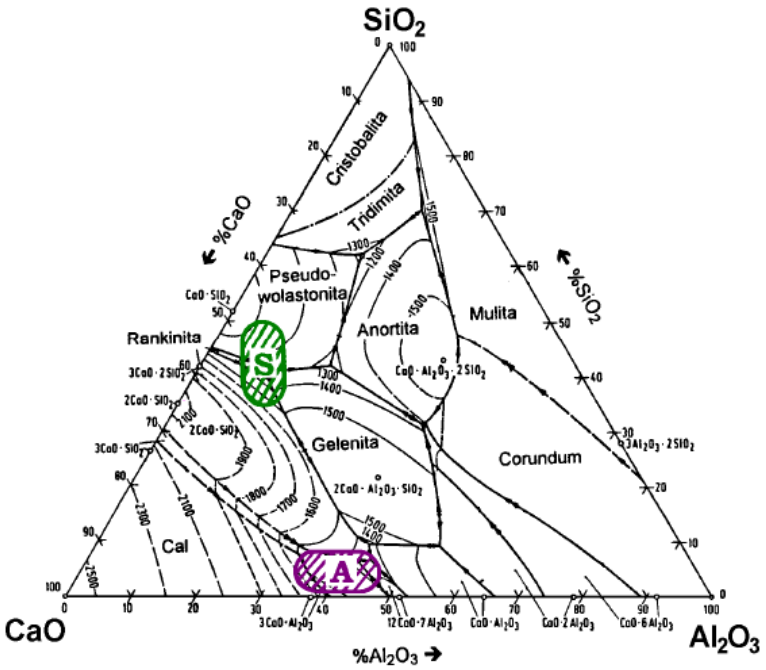
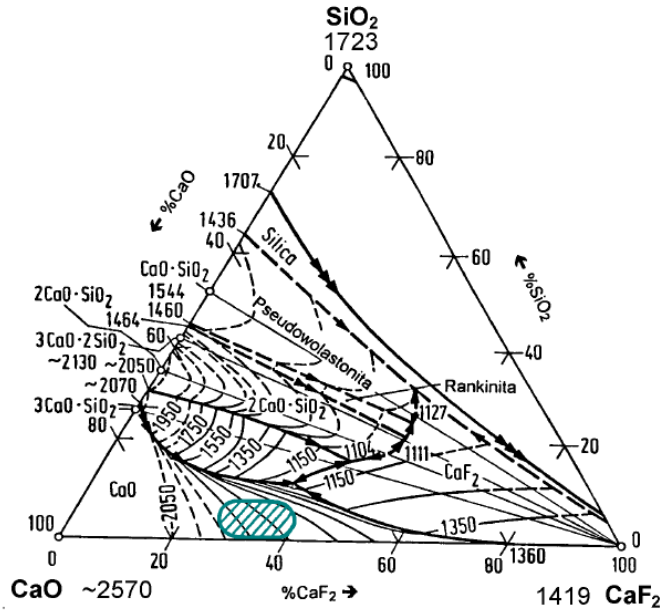


Figura 6. Diagrama ternario CaO-CaF2-SiO2



Fuente: BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 169

2.5.1 Influencia de la escoria en la desoxidación del acero: cuando se proyecta una escoria en el dominio Al_2O_3-CaO-SiO_2, uno de los primeros factores a ser considerados debe ser la desoxidación del acero. La principal razón es que en aceros calmados al aluminio, la sílice presente puede ser reducida por este elemento, reoxidando el acero y formando inclusiones de alúmina, que pueden ser perjudiciales para la calidad.

Las escorias sintéticas también pueden mejorar la efectividad de un desoxidante. Con la adición de una escoria de aluminato de calcio a un acero calmado al aluminio o al silicio-aluminio, ocurre la formación de un producto complejo de desoxidación promoviendo una reducción del oxígeno disuelto. Por ejemplo, en equilibrio 0,005 %Al reducirá el oxígeno disuelto en el acero líquido a 11 ppm. Sobre estas mismas condiciones, utilizando una escoria a base de aluminato de calcio, con cerca de 60%CaO, el tenor de oxígeno en el acero podrá llegar a 4 ppm, representando una reducción de casi 3 veces.

Las escorias a base de CaO-CaF_2 pueden ser utilizadas en la mayoría de los aceros, indistintamente de la desoxidación, pero representan un costo más elevado. Un ejemplo de escoria empleada para la fabricación de aceros para rodamientos donde la pureza interna es un factor crucial:

CaO= 64%	SiO_2= 6%
CaF_2= 15%	MgO= 6%
Al_2O_3= 5%	Otros= 4%

Para la operación del horno cuchara es importante que el revestimiento en la región de la escoria sea básico, en razón de las altas temperaturas que se dan (la escoria permanece con una temperatura superior a la del acero de 20° a 150°C, causadas por el arco eléctrico) y para disminuir el riesgo de ataque químico por parte de la escoria. A fin de disminuir la tendencia al desgaste del refractario básico es necesario saturar la escoria con MgO.[2]

2.5.2 Características físicas de la escoria: las tres principales formas de obtención de escorias sintéticas son las listadas abajo:

- Mezcla: tiene un costo más bajo, es más susceptible a la hidratación y variaciones en el desempeño.

[2] BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 169-171

- Sinterizada: producto obtenido por el calentamiento debajo del punto de fusión completo. Es muy porosa, siendo también propensa a la hidratación, aunque menos que la anterior.
- Pre-fundida: obtenida por el punto de fusión del CaO y Al_2O_3. Son características la consistencia en la composición y la hidratación casi nula, debido a la baja porosidad, pero el costo es más elevado.

En cuanto a la viscosidad de la escoria durante el tratamiento, algunos autores indican un factor de 10 a 15 poises. Pero es difícil la obtención de datos sobre la viscosidad. Por esto la temperatura liquidus pasa a asumir una mayor importancia. Se debe procurar escoria con una temperatura de liquidus compatibles con las temperaturas de tratamiento del acero líquido. Temperaturas de liquidus inferiores a las del acero generan escorias extremadamente fluidas que pueden causar erosión en los refractarios de la cuchara. Por otro lado, escorias con altas temperaturas de liquidus se tornan viscosas perjudicando la captación de inclusiones, operaciones de muestreo del acero líquido, adición de aleaciones o inyección de alambres, además de aumentar la posibilidad de la exposición del acero a la atmosfera y al arco eléctrico. Normalmente se espera que:

$$1450°C < \text{Temperatura de liquidus} < 1650°C$$

En conclusión, las escorias sintéticas deben ser diseñadas en función de dos objetivos, el tratamiento y el tipo de acero. Se necesita un control del grado de oxidación y una cierta proporción de MgO puede ser benéfica. En relación con la forma física, es necesario tener en cuenta la forma de aplicación y el tipo de equipos que hace la adición e igualmente dependerá de dos objetivos, el tratamiento y la relación costo/beneficio.[3]

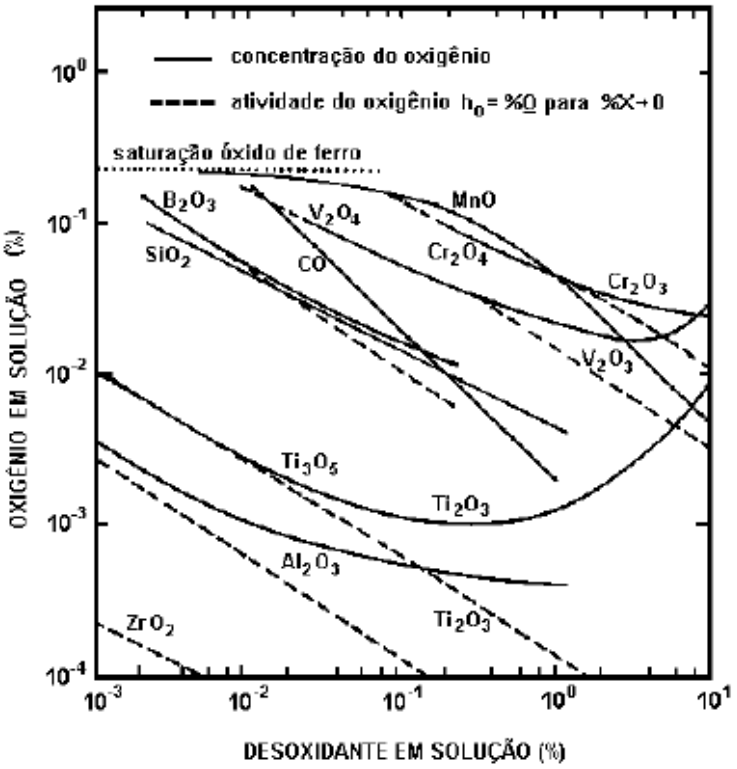
2.6 DESOXIDACIÓN DEL ACERO

La desoxidación en un horno cuchara es un proceso importante en el que la adición de ciertos elementos promueve la reducción del tenor de oxígeno disuelto en el acero, los valores necesarios para garantizar la integridad interna y superficial de los productos está en función de la calidad exigida. La desoxidación es comúnmente obtenida por elementos como el manganeso, carbono, silicio y aluminio.

[3] BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 169-171

En algunas situaciones especiales puede ser utilizado el titanio o aleaciones de calcio. La figura 7, muestra el poder desoxidante de algunos elementos.

Figura 7. Equilibrio a 1.600 °C entre elementos de aleación y el oxígeno en el hierro líquido



Fuente: BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 181

El trabajo de desoxidación es normalmente hecho adicionando primeros los desoxidantes más débiles. La figura 6 muestra el orden normal de los desoxidantes Mn, C, Si, y Al. A sí mismo, para la desoxidación el Si y el Al, se añade primero el Si en forma de ferroaleación granulada, regulando la agitación hacer la adición dentro del baño de acero líquido y no sobre la escoria como se muestra en la figura 9. El aluminio en estrellas o barras tiene un rendimiento muy variable debido a su baja densidad y fuerte afinidad con la escoria; por eso, cuando es necesario la adición de aluminio es importante poder hacerlo en las fases iniciales del tratamiento para posibilitar correcciones posteriores.

La práctica de desoxidación debe ser definida para cada caso específico, esta depende de los equipos disponibles en la acería, el tipo de acero a ser fabricado y la disponibilidad de tiempo.
En todos los casos el control del nivel de oxidación de la escoria es importante para un rendimiento adecuado de los desoxidantes y para la limpieza interna del producto.[4]

2.7 DESULFURACIÓN DEL ACERO

El azufre se encuentra de forma piritica en el baño de acero, por lo que su eliminación se consigue cuando este reacciona con metales o compuestos alcalinos o alcalino-térreos. Dado que la desulfuración ha de hacerse en un ambiente reductor, los agentes desulfurantes serán más efectivos si además de la parte básica tienen una componente reductora. En alguna ocasión se ha empleado como desulfurante el carbonato sódico Na_2CO_3, pero la formación de nubes molestas lo ha eliminado. En la actualidad se emplea cal o caliza, el carburo cálcico y silicio-calcio.[5]

En un adecuado proceso de desulfuración se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Una escoria liquida fluida con alto contenido disuelto de cal.
- Una temperatura alta que mejore la termodinámica y la cinética del proceso.
- Bajo contenido de oxígeno en el acero, mientras más bajo es mejor.
- Un volumen adecuado de escoria, que al ser mayor significa una mayor remoción de azufre para una misma relación de distribución de cargas fundentes.
- Agitación del acero líquido.

2.7.1 Reacción de desulfuración y capacidad de sulfuro: La transferencia de azufre desde la fase metálica hacia la escoria se describe mediante la siguiente reacción:

$$[S] + (O^{2-}) \leftrightarrow [O] + (S^{-2}) \qquad (3)$$

[4] BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 180-181
[5] ENRIQUEZ BERCIANO, José Luis; TREMPS GUERRA, Enrique. Monografias sobre tecnología del acero. Parte I. Acería Eléctrica. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid. Nov 2009. Pág. 125

Donde [S] y [O] representan el azufre y el oxígeno disueltos en el acero respectivamente, mientras que (S2-) y (O2-) son el sulfuro y el oxígeno en la escoria respectivamente.

En este caso el equilibrio de la reacción no se puede evaluar directamente, ya que existe dificultad al analizar la actividad de especies iónicas presentes en la escoria, por lo que se deben determinar experimentalmente de acuerdo a la siguiente reacción que muestra un equilibrio gas-escoria.

$$\frac{1}{2}S_2 + (O^{2-}) \leftrightarrow \frac{1}{2}O_2 + (S^{2-}) \qquad (4)$$

De esta manera, se puede determinar la constante de equilibrio según la siguiente ecuación:

$$k1 = \frac{aS^{2-}(aO_2)^{1/2}}{aO_{2-}(aS_2)^{1/2}} \qquad (5)$$

Entonces, las actividades tanto del oxígeno gaseoso como del azufre gaseoso pueden ser reemplazadas por sus presiones parciales, como se indica en la reacción:

$$k1 = \frac{aS^{2-}}{aO_{2-}}\left(\frac{pO_2}{pS_2}\right)^{1/2} \qquad (6)$$

De esta expresión se puede definir la capacidad de sulfuro Cs de acuerdo a la ecuación 7, la cual es una propiedad de la escoria que depende únicamente de la temperatura y la composición de la escoria. La capacidad de sulfuro describe el potencial de una determinada escoria fundida para eliminar azufre, y que su vez podría ser utilizada para comparar las características de desulfuración de una escoria diferente.

$$Cs = \left(\frac{pO_2}{pS_2}\right)^{1/2} \qquad (7)$$

Dado que las actividades de los óxidos y la presión parcial de las fases gaseosas no se encuentran fácilmente disponibles como parámetros del proceso, la capacidad de sulfuro se suele expresar en términos de la temperatura y composición como se dijo anteriormente, y de esta forma se emplean como herramientas de control de procesos.

La ecuación (8) muestra uno de los modelos planteados para obtener la capacidad de sulfuro en función de la temperatura en un rango entre 1400ºC y 1700ºC y un nuevo termino que se conoce como basicidad óptica (Λ).

$$\log Cs = \frac{[22690 - (54640\Lambda)]}{T} + (43{,}6 - 25{,}2) \qquad (8)$$

2.7.2 Actividad de oxígeno: tiene un gran impacto sobre la partición de azufre. Generalmente para la desoxidación del metal en la cuchara, en este sentido, mientras más alta sea la concentración del agente desoxidante (Al o FeSi) en el metal, habrá una menor actividad de oxígeno. Dependiendo del agente desoxidante, usualmente cuando se usa aluminio la actividad de oxígeno es menor que cuando se usa ferrosilicio. De la misma manera, mientras menor sea la actividad del óxido correspondiente (en la escoria, o en el metal como inclusiones) habrá una menor actividad de oxígeno. Un valor bajo en la actividad de oxígeno implica una mayor partición de azufre, por consiguiente, existirá una mayor remoción de azufre en el acero.

De este modo se puede determinar la actividad de oxígeno para el proceso de desulfuración de dos formas diferentes:

Una medición real de la actividad de oxígeno y la temperatura en la cuchara mediante una lanza, misma que produce una fuerza electro motriz (emf) y que se mide en voltios de forma relativa a una celda de referencia con un potencial de oxígeno conocido. Dicha fuerza electro motriz es recalculada o convertida en una señal que indica el contenido de oxígeno en partes por millón (ppm), y en algunas ocasiones como contenido de carbono.

La otra forma de calcular la actividad de oxigeno se realiza con base en la reacción de equilibrio escoria-metal tomando en cuenta el agente desoxidante. No obstante, existe una dificultad al realizar este cálculo al estimar la actividad del óxido correspondiente que se forma de acuerdo al agente desoxidante, sea óxido de aluminio (Al2O3) o dióxido de silicio (SiO2). Sea cual sea el agente empleado, se debe estimar su actividad mediante una correlación determinada experimentalmente en sistemas similares o con modelos que permitan establecer una actividad aproximada.

2.7.3 Temperatura: otro parámetro esencial en el proceso de desulfuración es la temperatura, misma que influye sobre la viscosidad y la capacidad de sulfuro en la escoria, consecuentemente influye sobre la partición de azufre en la fase metálica y en la escoria. La viscosidad interviene en la cinética de la reacción de la cuchara.

Tanto la viscosidad del acero como de la escoria afecta la transferencia de masa durante la refinación del acero en el horno cuchara. Entonces, si se tiene una escoria con una baja viscosidad, existe una mejor dispersión del sistema en la fase metálica y además al área interfacial se aumenta, por ende, existe una mayor transferencia de masa de azufre de la fase metálica hacia la escoria.

2.7.4 Basicidad óptica: se emplea para clasificar a los óxidos en una escala de acidez. Este concepto proviene entre otros principios, de la teoría de ácidos y bases de Lewis, en donde se indican que sustancias como las bases pueden ser consideradas como donantes de electrones, respecto a los ácidos que poseen su octeto de electrones incompleto y que como resultado puede existir una reacción de adición entre una base un ácido de Lewis.

En este contexto, los científicos Duffy e Ingram en 1976, se dedicaron a estudiar el comportamiento de materiales vítreos y de escorias bajo radiación ultravioleta y se dieron cuenta que existen cambios de frecuencia en su banda de absorción. Estos cambios se pueden expresar en términos de la basicidad óptica, la cual es una relación de la capacidad de donar electrones de las sustancias que componen la escoria respecto a la de un patrón (óxido de calcio) que posee un valor de basicidad óptica de 1. En definitiva, este valor es una medida de la concentración de las diferentes especies de oxígeno en mezclas fundidas de alúmino-silicatos. La ecuación 9 muestra dicha relación:

$$\Lambda = \frac{capacidad\ de\ donar\ electrones\ de\ la\ escoria}{capacidad\ de\ donar\ electrones\ del\ CaO} \qquad (9)$$

La tabla 1 muestra los valores teóricos de la basicidad óptica para algunos óxidos. Dichos valores son adimensionales. [6]

[6] GAVILANES, Dayana. Diseño de una escoria sintética desulfurante para el proceso de afino en el horno cuchara de una acería. Tesis de ingeniería química Quito.: Escuela Politécnica Nacional. 2016. pág. 7-15

Tabla 1. Basicidad óptica de algunos óxidos

Óxido	Basicidad óptica
Na_2O	1,15
CaO	1,0
MgO	0,78
CaF_2	0,67
TiO_2	0,61
Al_2O_3	0,61
MnO	0,59
Cr_2O_3	0,55
FeO	0,51
Fe_2O_3	0,48
SiO_2	0,48

GAVILANES, Dayana. Diseño de una escoria sintética desulfurante para el proceso de afino en el horno cuchara de una acería. Tesis de ingeniería química Quito;Escuela Politécnica Nacional. 2016. pág.15

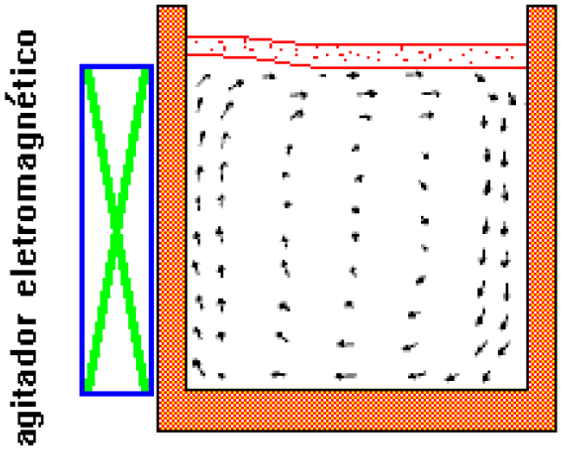
2.8 AGITACION DEL ACERO LÍQUIDO

La agitación del baño líquido es fundamental para el calentamiento. La razón es que el arco eléctrico irradia gran parte del calor hacia la escoria, que a su vez lo transmite al acero. Por esto, la renovación del acero en la interface con la escoria es de suma de importancia.

2.8.1 Agitación electromagnética inducida: el principio de esta agitación reside en el hecho de que los metales líquidos o sólidos sometidos a la acción de un campo magnético alternado presentan tensiones o consecuentemente corrientes inducidas. Estas corrientes pueden producir calentamiento como los hornos de inducción y también fuerzas electromagnéticas que pueden ser utilizadas para el movimiento de estos metales.

Los agitadores electromagnéticos usados en los hornos cuchara utilizan ese principio a través de una bobina por donde circula una corriente alterna generando un campo electromagnético, este penetra la pared de la cuchara y provoca un movimiento en el metal líquido como se muestra en la figura 8.[7]

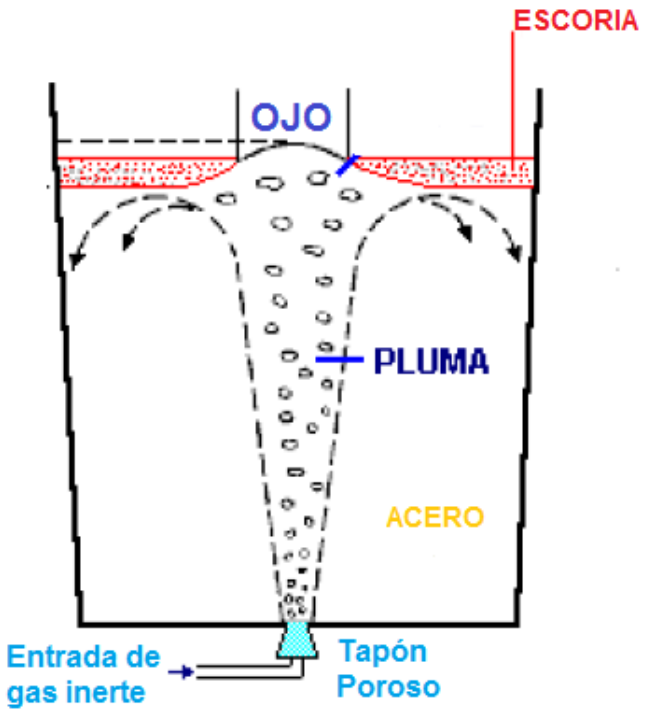
Figura 8. Líneas de flujo del acero líquido con agitación electromagnética



Fuente: BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 150

2.8.2 Agitación por burbujeamiento de gases inertes: se realiza a través de un tapón poroso en la parte inferior de la cuchara o lanza refractaria: este tipo de agitación es uno de los procesos más comunes de metalurgia en cuchara y es ampliamente usado en las acerías, la representación de la inyección de los gases al acero líquido se muestra en la figura 9, para el caso del burbujeamiento a través del tapón poroso posicionado en el centro de la cuchara.

Figura 9. Inyección de gases por tapón poroso en el centro de la cuchara



Fuente: BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 156

La región por donde pasan las burbujas de gas es llamada pluma, esta tiene forma de hongo. La región superior expuesta a la atmosfera tiene el nombre de ojo.

Además del efecto de la agitación en el calentamiento, el movimiento puede ayudar a la fluctuación de las inclusiones existentes y homogenizar el baño química y térmicamente. Estos dos últimos efectos son particularmente importantes en el proceso de refino secundario del acero líquido. Por este motivo, la agitación por inyección de gases inertes o burbujeamiento es actualmente utilizada en todas las acerías.[8]

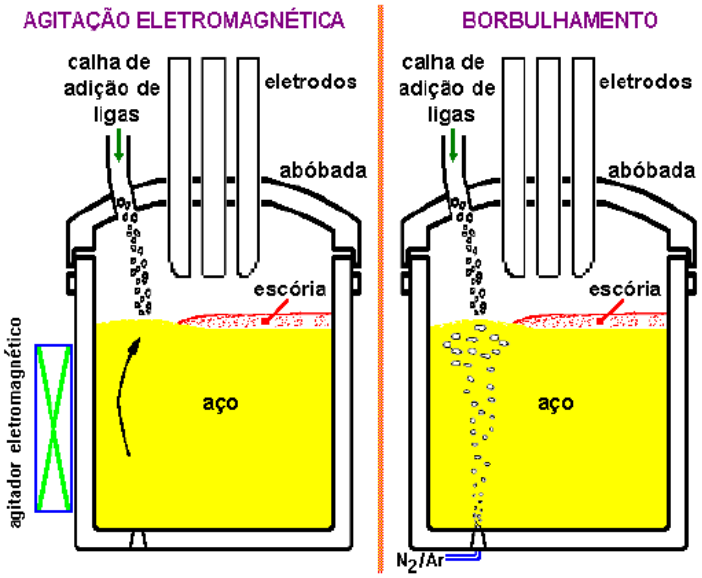
[8] BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 156

2.9 ADICIÓN DE ALEANTES EN HORNO CUCHARA

El horno cuchara debido a sus características de permitir el calentamiento posibilita la adición de grandes cantidades de ferroaleantes, siendo necesario el calentamiento excesivo del acero. Normalmente, los ferroaleantes son adicionados de forma sólida en tamaños que varían de 2 a 100mm, o a través de encapsulados con envoltorio de acero, conocidos como “cored-wire”.

La pérdida para la escoria es uno de los principales factores que reducen el rendimiento de las aleaciones adicionadas. Con la finalidad de elevar este rendimiento se aumenta la intensidad de la agitación alejando la escoria y exponiendo el acero líquido antes de adicionar el material. La figura 10 ilustra el proceso de adición de aleaciones con agitación electromagnética y por gases. Se debe notar la remoción de la escoria causada por la agitación del baño.

Figura 10. Adición de aleaciones sólidas usando agitación por gases y electromagnética



Fuente: BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 175

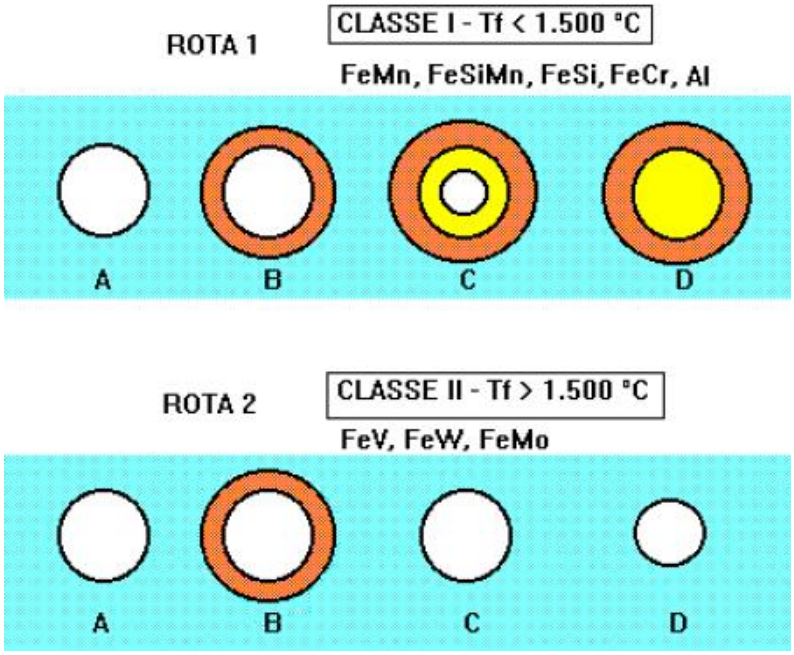
2.9.1 Disolución de las aleaciones en el baño. Las aleaciones son de gran utilidad para darle las propiedades al acero dependiendo de su uso final. Estas se pueden clasificar según su punto de fusión, este afecta la velocidad de disolución del a aleación en el baño. Clase I: aleaciones cuyo punto de fusión está por debajo del punto de solidificación del acero, esto es debajo de los 1500°C aproximadamente. La absorción por el baño se da a través del fenómeno de fusión. Esta clase incluye FeMn, FeSiMn, FeCr, FeSi, Al. La ruta 1 de la figura 11, muestra una idealización de este proceso de absorción. La adición de la aleación fría en el baño (1A) promueve la solidificación alrededor de una capa de acero (1B) mientras la aleación se funde (1C). Frecuentemente la aleación se funde totalmente antes de que la capa de acero sea refundida y liberada al baño (1D). El FeSi tiene una modalidad interesante de disolución, pues esta forma con la capa de acero un eutéctico líquido. Esta reacción es exotérmica causando una erosión interna de la capa y facilitando la disolución de la aleación.

Clase II: aleaciones cuyo punto de fusión está por encima del punto de solidificación del acero. Ejemplos típicos son el FeV, FeW, FeMo, FeNb. Siguiendo la ruta 2 de la figura 11, la adición de la ferroaleación provoca la solidificación de una capa de acero (2B). Sin embargo, esta se refunde para liberar la aleación solida (2C), cuya temperatura de fusión está por encima de la temperatura del baño. De esta forma ocurre un proceso de disolución sólido-líquido que regula la cinética de la reacción. La disolución de estas aleaciones se ve enormemente afectada por su solubilidad y difusividad en el acero y por la hidrodinámica (agitación) existente.

La figura 12 muestra el tiempo de disolución calculado para diversas aleaciones de clase I con un acero a 1600ºC y un diámetro inicial de 6m y también ilustra el caso para las aleaciones clase II. Se puede verificar que la clase II tiene un tiempo de disolución superior en comparación con las de clase I. Evidentemente, la agitación del baño reduce el tiempo de disolución de las aleaciones de clase II. A sí mismo, la importancia de la agitación después de la adición de esas aleaciones.[9]

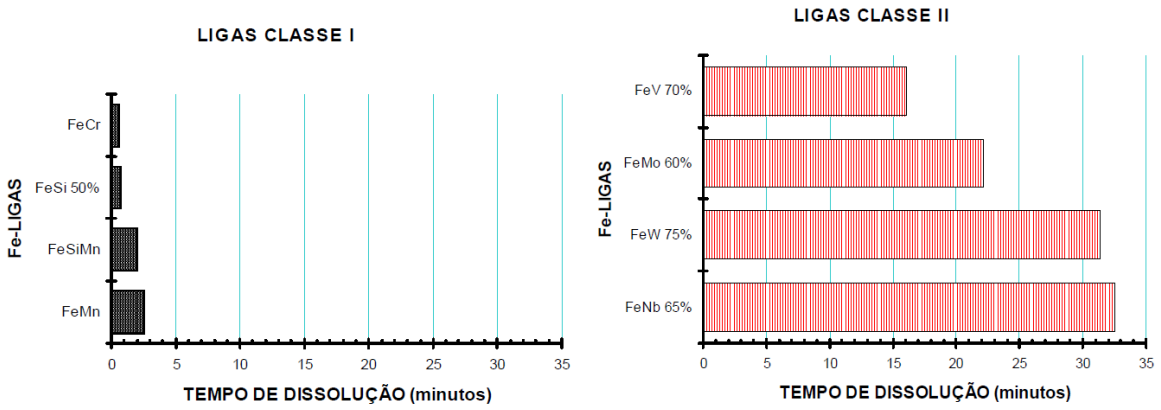
[9] BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 175-176

Figura 11. Idealización del proceso de absorción de aleantes para el acero líquido. Ruta 1: aleantes clase I. Ruta 2: aleantes clase II



Fuente: BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 176

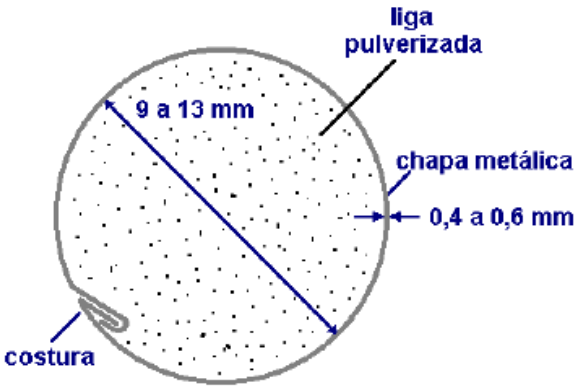
Figura 12. Tiempo de disolución de aleaciones Clase I y Clase II



BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 177

2.9.2 Inyección de aleaciones en alambres: la adición de aleaciones pulverizadas en el acero líquido, encapsuladas en un envoltorio metálico constituye una de las más importantes evoluciones en términos de metalurgia en cuchara. La figura 13, muestra un corte esquemático transversal de un alambre rellenado de una aleación. Este es fabricado colocando una aleación pulverizada sobre una tira de acero de bajo carbono. Una máquina especial va curvando la tira hasta formar una costura mecánica. Posteriormente el alambre es embobinado de manera que permita el desenrollamiento para ser usado.

Figura 13. Corte transversal de un alambre "relleno" de aleación



BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 177

Básicamente cualquier tipo de aleación puede ser encapsulada, incluso las de alta reactividad como como las aleaciones de calcio. La excepción son las de aluminio por su facilidad de conformado puede ser suministrado en forma de bobinado sin envoltura protectora.[10]

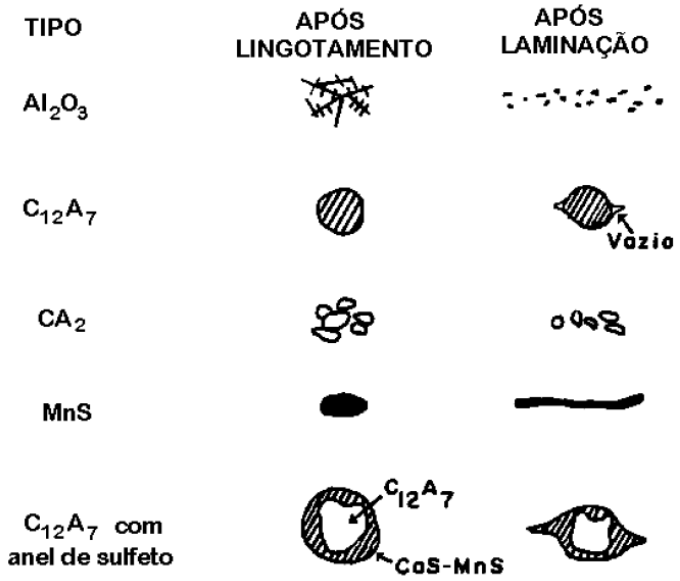
2.10 LIMPIEZA DEL ACERO

En las operaciones de fabricación y solidificación del acero se forman impurezas no metálicas llamadas inclusiones. El aspecto que presentan algunas de estas impurezas están ilustradas en la figura 14.

[10] BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 178

Las inclusiones de alúmina, Al_2O_3, evidentemente aparece con la adición de Aluminio al acero. Después de la laminación, se quedan en forma de aglomerados de pequeñas inclusiones que son perjudiciales para las fases de estampado del producto por fragilizar las regiones donde ocurren. También son indeseables cuando se realiza la trefilación para diámetros finos porque provocan quiebres.

Figura 14. Inclusiones presentes en el acero lingoteado y laminado.



Fuente: BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 204

Las inclusiones de $12CaO.7Al_2O_3$ son líquidas a temperaturas de colado y se producen con la adición adecuada de calcio al acero previamente desoxidado con aluminio. Un punto favorable para este tipo de inclusiones es que siendo líquidas no pueden adherirse a las paredes de las válvulas sumergidas de la colada continua, al contrario, las de alúmina que provocan obstrucciones.

Por otro lado, las inclusiones de $12CaO.7Al_2O_3$ son esféricas y es importante tener un cuidado especial para promover su fluctuación durante el colado. Al laminar el acero, por ser una inclusión indeformable en las temperaturas de laminación, se forman vacíos en el sentido de la laminación. Entre tanto esas inclusiones son distribuidas en la matriz del acero, en pequeñas y finas cantidades no afectan las características isotrópicas requeridas para los aceros.

Adiciones insuficientes de calcio en los aceros calmados al aluminio pueden producir la formación de inclusiones de $CaO.2Al_2O_3$, estas son más grandes las inclusiones de alúmina.

El sulfuro de Manganeso tiene bajo punto de fusión y se elonga durante la laminación en caliente. Estas inclusiones perjudican las propiedades mecánicas del acero. Por ejemplo, reducen la ductilidad y la energía de absorción para producir fracturas

El MnS también provoca mayor susceptibilidad a las fracturas causadas por hidrógeno. Por eso, para aplicaciones críticas este tipo de inclusiones deben ser eliminadas. De otra manera, para los aceros mecanizados estas inclusiones son deseables.

2.10.1 Control de la morfología de los sulfuros. Para la mayoría de los aceros, los niveles de Mn y S no son suficientes para la formación de MnS en la masa líquida. Sin embargo, durante la solidificación el manganeso y azufre son rechazados desde el frente de solidificación provocando un incremento de sus concentraciones en el líquido remanente. Este fenómeno es conocido como enriquecimiento interdendrítico. Los tenores de Mn y S crecen en el líquido interdendrítico y en el final de la solidificación se forma el MnS.

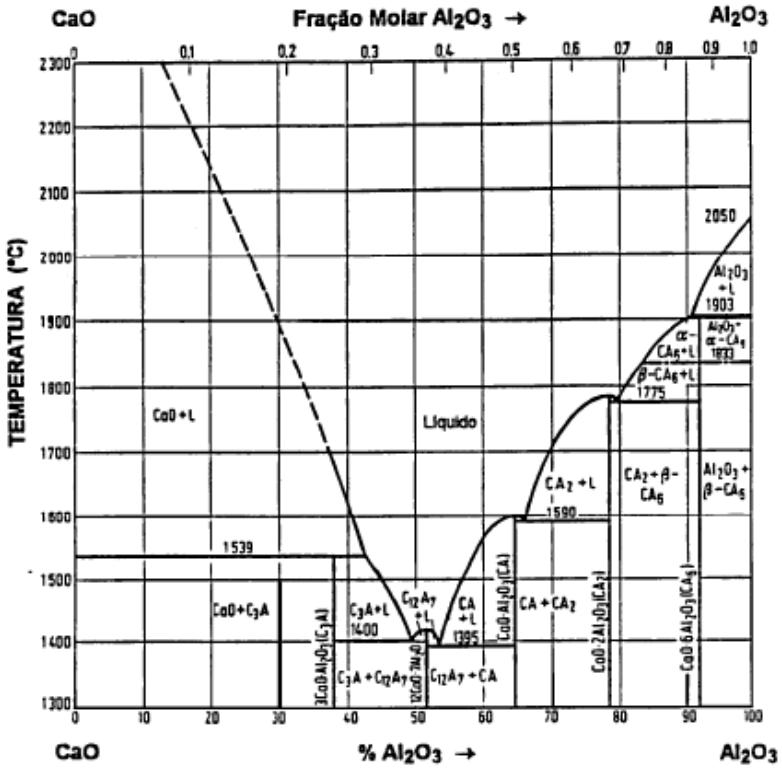
Normalmente hay dos métodos para controlar la morfología de los sulfuros: adición de calcio o cerio (tierras raras). En ambos casos es necesario primero desulfurar el acero a un mínimo de 0,008% preferencialmente a 0,006%. Cuando el calcio es adicionado a los aceros calmados al aluminio, este primero transforma las inclusiones de alúmina a aluminato de calcio.

2.10.2 Control de la morfología de óxidos. A menudo es deseable modificar las inclusiones de óxidos y, en particular, cambiar las inclusiones de alúmina en calcio-aluminatos para mejorar la calidad superficial o para permitir la colada continua sin obstrucción de las válvulas. Si el Al2O3 está presente durante la laminación, las dendritas se rompen, formando aglomerados alargados de inclusión que pueden provocar serios defectos superficiales.

Por otro lado, la alúmina siendo sólida en las temperaturas de fabricación y colado de los aceros, puede acumularse en las válvulas causando obstrucción. El diagrama binario de la Figura 15, muestra que una inclusión de 12CaO.7Al2O3 formada por la introducción de CaO (o Ca) en alúmina, tiene baja temperatura líquida, siendo líquida en la temperatura de colada e impidiendo su aglomeración en las paredes de las válvulas.

Para los aceros normales calmados al Al, la adición de Ca modificará primero las inclusiones de óxidos. Es termodinámicamente fácil de formar CaO.2Al2O3 (CA_2), que será convertido en CaO.Al2O3 (CA) y finalmente en calcio-aluminatos ricos en CaO. Las adiciones mayores de calcio provocarán la desulfuración del acero a niveles bajos. El control de la morfología de sulfuros y la eliminación de la mayor la parte de MnS ocurrirá solamente cuando el contenido de azufre sea inferior al 0,005%.[11]

Figura 15. Diagrama de fases Al2O3-CaO



Fuente: BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 207

[11] BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 203-207

2.11 CUIDADOS POSTERIORES AL TRATAMIENTO DEL ACERO

La flexibilidad y confiabilidad en una acería proporcionada por la utilización del horno cuchara es enorme como se vio por las múltiples funciones que este equipo permite ejecutar. El calentamiento, con una escoria debidamente controlada, asociada a una agitación adecuada posibilita la obtención de un acero con las mejores condiciones de calidad para el colado:

- Variación de temperatura final en rango muy estrecho.
- Adición de aleantes y desoxidación con un mínimo de pérdidas y con ajuste de composición química en un rango muy estrecho.
- Tasas de desulfuración pueden superar el 50%, con azufre inicial en el rango de 0,015% a 0,020%, sin pérdida de control de temperatura.
- Limpieza y morfología de las inclusiones bien controladas.

Entretanto, es fundamental que se tomen los cuidados para preservar la calidad del acero líquido antes y durante el colado. Es decir, la propia cuchara debe estar en buenas condiciones térmicas y de limpieza, el acero debe ser protegido de cualquier contacto con la atmosfera, los canales de colado convencional (cuando fuera el caso) deben estar limpios y tener los cuidados indicados en la tabla 2.[12]

Tabla 2. Cuidados posteriores al tratamiento do acero líquido

MEDIDA	OBJETIVO
Adicionar material aislante sobre la escoria (por ejemplo, cascara de arroz).	• Minimizar perdidas térmicas por la superficie • Mantener la escoria liquida facilitando su remoción después del colado
Tapar la cuchara	Item anterior
Minimizar el tiempo entre final de agitación e inicio del colado.	Mejorar la homogeneidad térmica del acero en la cuchara
Limpiar canales de colado convencional.	Evitar la aparición de inclusiones exógenas, es decir, impurezas no generadas durante la fabricación

[12] BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 216-218

MEDIDA	OBJETIVO
En la colada continua, en aceros de calidades superiores usar tubo largo (cuchara para el distribuidor) y válvulas sumergidas con (distribuidor para los moldes) con sellado bien hecho.	Evitar reoxidación
En la colada convencional, en aceros de calidad superior, proteger el chorro de acero de la cuchara para el mástil y usar la velocidad de colado que evita la exposición del acero en las lingoteras.	Evitar reoxidación

Fuente: BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 218

2.11 PROCESO MAQUINA DE COLADA CONTINUA

Finalizado el afino, la cuchara de colada se lleva hasta la artesa receptora (torreta) de la colada continua donde vacía su contenido en una artesa receptora (tundish). La colada continua es un procedimiento siderúrgico en el que el acero se vierte directamente en un molde de fondo desplazable, cuya sección transversal tiene la forma geométrica del semiproducto que se desea fabricar; en este caso la palanquilla. Figura 16.

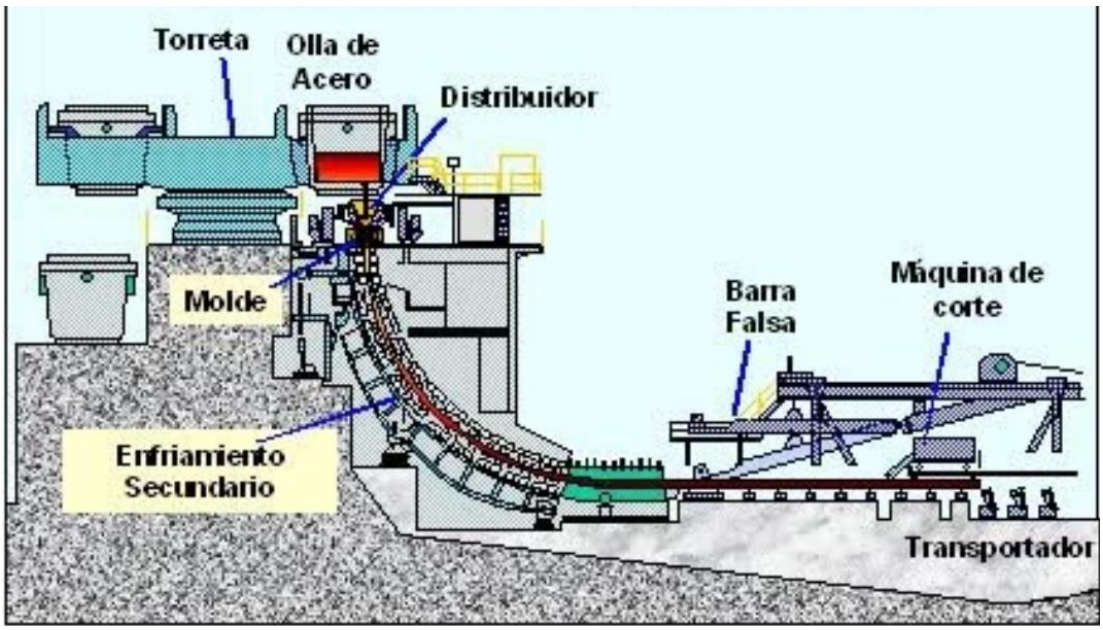
La artesa receptora tiene un orificio de fondo, o buza, por el que distribuye el acero líquido en varias líneas de colada, cada una de las cuales dispone de su lingotera o molde, generalmente de cobre y paredes huecas para permitir su refrigeración con agua, este objeto de cobre sirve para dar forma al producto. Durante el proceso la lingotera se mueve alternativamente hacia arriba y hacia abajo, con el fin de despegar la costra sólida que se va formando durante el enfriamiento.

Posteriormente se aplica un sistema de enfriamiento controlado por medio de duchas de agua fría primero, y al aire después, cortándose el semiproducto en las longitudes deseadas mediante sopletes que se desplazan durante el corte.

En todo momento el semiproducto se encuentra en movimiento continuo gracias a los rodillos de arrastre dispuestos a lo largo de todo el sistema.

Finalmente, se identifican todas las palanquillas con el número de referencia de la colada a la que pertenecen, como parte del sistema implantado para determinar la trazabilidad del producto, vigilándose la cuadratura de su sección, la sanidad interna, la ausencia de defectos externos y la longitud obtenida.[13]

Figura 16. Esquema máquina de colada continua



Fuente: WORDPRESS [en línea]. [Consulta 02 de febrero de 2019] Disponible en https://xiderexdotcomdotmz.wordpress.com/2016/01/12/que-es-la-colada-continua/

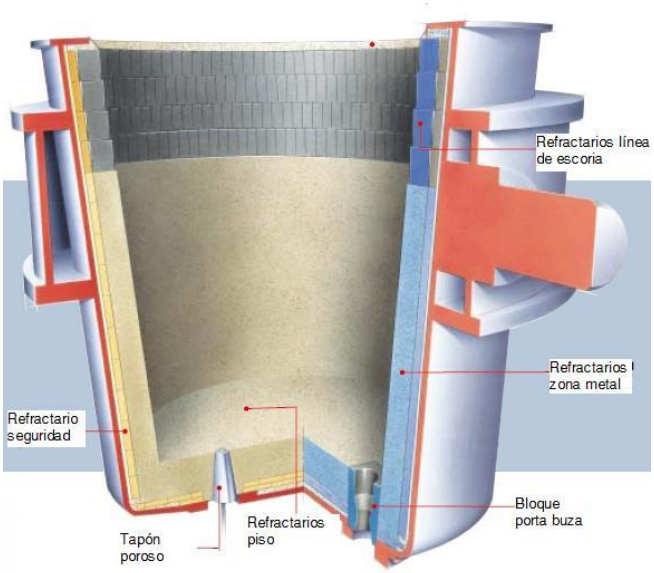
2.12 CUCHARAS DE ACERO LÍQUIDO

Las cucharas utilizadas son iguales a las tradicionales, excepto que deben ser diseñadas con una altura libre (free board) del borde superior al nivel del metal superior a 600 mm para evitar rebosamientos, salpicaduras y adherencia de proyecciones, en especial si los tratamientos con cored wire utilizan calcio, cuya reacción es bastante violenta debido a la alta presión de vapor.

[13] UP COMMONS. Proceso de fabricación del acero [en línea] <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3319/55868-7.pdf?sequence=7&isAllowed=y> [citado en 24 de enero de 2019]

Es indispensable además un sistema de agitación por burbujeo de gas inerte o electromagnético, y en muy raras ocasiones se combinan ambos. Se divide en dos zonas con refractarios especializados en cada una: zona de metal y zona de escoria. Los refractarios son del tipo básico, del tipo dolomítico y/o magnesítico, que permiten una eficiente desulfuración y una buena duración.

Figura 17. Diseño de cuchara de acero líquido

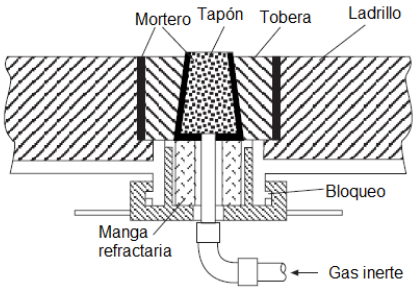


Fuente: VILLA, Enrico. Metalurgia en cuchara. 2011 [Presentación power point]. P21

2.12.1 Tapón poroso. Para lograr una temperatura homogénea del baño y composición, el acero en la cuchara se agita por medio de burbujeo de gas argón por tasas moderadas de burbujeo de gas, por ej. Por encima de 0,6 Nm3 / min (~ 20scfm) se utilizan tapones refractarios porosos, generalmente montados en el fondo de la cuchara. Una Ilustración esquemática de un conjunto de tapón poroso en el fondo de la cuchara es mostrado en la figura 18.

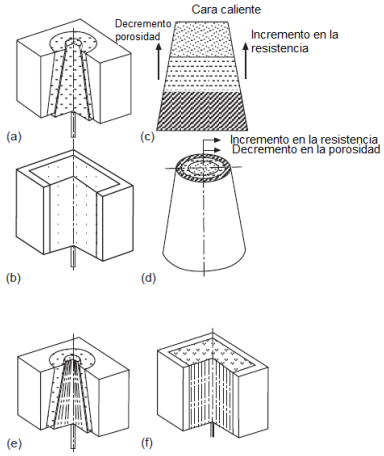
Como se pueden ver en la figura 19, los tapones porosos tienen una forma cónica o rectangular. Los de forma cónica son más fáciles de cambiar si el tapón se desgasta antes del revestimiento. Los tapones rectangulares son geométricamente compatibles con los ladrillos circundantes y pueden ser utilizados para aprovechar los casos en que la vida del tapón es comparable con el del revestimiento. El rendimiento y la vida de tapones isotrópicos pueden ser mejorados produciendo el elemento en dos o tres componentes apilados junto con inserciones metálicas.

Figura 18. Conjunto de tapón poroso en el fondo de la cuchara



Fuente: BARKER, Keith J, et al. Steelmaking and Refining Volume. Pittsburgh. The AISE Steel Foundation. 1998. Pág. 669

Figura 19. Formas estándar de tapones isotrópicos: (a) y (b). Componentes del tapón: corte (e), concéntrico (d). Tapones capilares: cónico (e), regular (f)



Fuente: BARKER, Keith J, et al. Steelmaking and Refining Volume. Pittsburgh. The AISE Steel Foundation. 1998. Pág. 669

La principal ventaja de la llamada porosidad direccional o tapón capilar, mostrado en la figura 19 (e) y (f) es que el tapón puede estar hecho del mismo refractario denso como el ladrillo de revestimiento, o incluso más denso. Esto resulta en el incremento de la resistencia a la compresión en caliente, mayor resistencia a la erosión y una vida de servicio más larga. Las desventajas de los tapones capilares son que son más propensos a la infiltración por acero líquido en caso de pérdida de presión del gas argón.[14]

[14] BARKER, Keith J, et al. Steelmaking and Refining Volume. Pittsburgh. The AISE Steel Foundation. 1998. Pág. 669

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 Como considera el autor de la tesis DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COLADA CONTINUA MEDIANTE LA RUTA DE CALIDAD EN LA EMPRESA ANDEC S.A. el control del proceso de colada implica establecer una gestión de los indicadores que miden los resultados de dichos procesos. El seguimiento de un proceso ayuda a identificar la causa que origina un resultado no esperado e inclusive identificar oportunidades de mejorarlo.(Méndez, 2016)

3.2 Roberto Carro Paz en su texto DE ADMINISTRACIÓN DE LAS OPERACIONES menciona que el control estadístico de procesos (SPC) tiene como objetivo hacer predecible un proceso en el tiempo. Las herramientas usadas para este fin son las gráficas de control que permiten distinguir causas especiales de las causas comunes de variación. Luego de identificarlas con el grafico, el paso siguiente es eliminar las causas especiales, ya que son ajenas al desenvolvimiento natural del proceso con lo que se logra el estado de Proceso Bajo Control Estadístico; es decir, un proceso predecible y afectado exclusivamente por causas comunes (aleatorias) de variación.

3.3 Iara Takehara y otros evaluaron en su artículo de DESOXIDACIÓN EN EL HORNO CUCHARA FRENTE A LOS PARÁMETROS DE AGITACIÓN DEL ACERO LIQUIDO la posibilidad de mejorar los controles para la optimización del proceso de refino secundario para mejorar la eficiencia de la desoxidación y el rendimiento de las aleaciones con la variación de agitación por inyección de gases inertes. Los resultados evidencian que el rendimiento del silicio es una herramienta adecuada para prever el nivel de oxidación del acero líquido, la influencia del desempeño de la escoria y los parámetros de la agitación por inyección de gases inertes durante el refino secundario son de gran influencia en el desempeño del rendimiento de las aleaciones y la desoxidación del acero líquido.

3.3 S-L. Jamsa-Jounela y otros en su artículo “EVALUATION OF CONTROL PERFORMANCE: METHODS, MONITORING TOOL AND APPLICATIONS IN A ZINC PLANT” hablan sobre el crecimiento continuo de la industria y los problemas que existen para mantenerla bien sincronizada. Mencionan la importancia de mantener de manera adecuada los sistemas de control para asegurar la calidad del producto.

Un buen desempeño control de las variables del proceso tiene un efecto considerable en la productividad de la planta, bajo consumo de materias primas y energías, así como una mayor vida útil de los equipos.

3.4 En el Handbook sobre Six Sigma los autores hablan sobre las variables a tener en cuenta para un control de procesos efectivo y un mejoramiento continuo de los procesos, mencionando la importancia de la comunicación, el papel de los lideres, la educación y la formación de los operadores, estas como herramientas para cambiar las percepciones, comportamientos individuales, tener personal capaz de desarrollar las actividades no solo con conocimientos empíricos sino teóricos que le permiten analizar y tomar mejores decisiones.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este proyecto se realizó una investigación exploratoria con el objetivo de identificar las variables que afectan el proceso en el horno cuchara a través de un acompañamiento a las actividades desarrolladas en el procesamiento de las coladas.

4.1 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto se llevaron a cabo las siguientes etapas:

Etapa 1: Recopilación de la información

Recolección del material bibliográfico acerca del funcionamiento técnico, las guías de operación y el proceso operativo en campo del horno cuchara.

Etapa 2: Medición y seguimiento al tiempo de procesamiento de coladas

Implementación de un indicador para los tiempos de procesamiento de coladas en el horno cuchara, seguimiento permanente al indicador y análisis mensual de éste.

Etapa 3: Acompañamiento al proceso en el horno cuchara

Identificación de las desviaciones operativas propias del horno cuchara que afectan el desarrollo normal de las operaciones en la acería.

Etapa 4: Actualización de guías de operación

Actualización y socialización con el personal involucrado de las guías de operación del horno cuchara conforme a las necesidades del proceso.

Etapa 5: Socialización de resultados

Entrega de las propuestas de mejora para las prácticas operativas en el horno cuchara con todos los soportes de la investigación.

4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

La variable medida en este proyecto es el tiempo de procesamiento de las coladas en el horno cuchara cuando en la acería se está produciendo acero vía horno eléctrico y vía convertidores al mismo tiempo estableciendo un objetivo para este que satisface las necesidades de producción de la acería. Existen diferentes variables que afectan los tiempos de procesamiento como son los problemas operacionales y de mantenimiento de los procesos anteriores al horno cuchara (horno eléctrico y convertidores), el proceso posterior en la máquina de colada continua y los problemas de mantenimiento del horno cuchara, estas variables no van a ser estudiadas en el proyecto. Las variables que se identifican y son objeto de estudio en este proyecto son operativas propias del horno cuchara.

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1 ETAPA 1: RECOPILACIÓN DE LA INFORMACIÓN

En la primera etapa se realizó un acompañamiento a las actividades desarrolladas en el horno cuchara para adquirir la información del funcionamiento del equipo y la forma como se realiza el procesamiento del acero.

5.1.1 Equipo. El horno cuchara de Acerías Paz del Río S.A es un Danielli Standard de bóveda fija con un sistema de manipulación de cucharas por carro cuchara, con una capacidad nominal de 45 toneladas. Los componentes y equipos auxiliares son:

- **Plataforma de trabajo:** se encuentra posicionada alrededor de la bóveda, compuesta de un robusto armazón de perfil anclado a las fundaciones y reforzada con cemento resistente al calor. Permite realizar de forma adecuada las operaciones y almacenar las materias primas necesarias para la correcta operación. Además, cuenta con una estación de electrodos para hacer la instalación de nuevos elementos al electrodo y la limpieza de los mismos.

- **Caja:** estructura de carpintería metálica fijada a las fundaciones, alojamiento de las ruedas de deslizamiento de las columnas electrodos y de la columna de levantamiento de la bóveda.

- **Sistema de levantamiento de la bóveda:** el puente se compone de una columna en tubo de acero completa de guías de deslizamiento en acero, el movimiento de la columna es asegurado por un cilindro hidráulico. El deslizamiento de la columna es realizado por cuatro pares de ruedas guía completas de cojinetes antifricción.

- **Sistema de levantamiento electrodo:** este sistema es igual que el de levantamiento de la bóveda. En caso de falta de tensión a los electrodos, el dispositivo los hace subir automáticamente a fin de carrera superior poniéndolos en condiciones de seguridad.

- **Protección anticalor:** está compuesta de paneles llenas de concreto refractario puestos sobre un armazón fijado a las fundaciones y mantenidos unidos entre sí mediante unas abrazaderas de conexión.

- **Bóveda de paneles enfriados:** de tipo aspiración lateral, cuyo objetivo es de reducir la infiltración de aire falso bajo la bóveda del horno cuchara, obteniendo al mismo tiempo una reducción del porcentaje de oxígeno y una menor remoción de energía térmica.

- **Brazos portaelectrodos:** estos componentes tienen la función de soportar los electrodos y los tubos portacorriente enfriados posicionados sobre los mismos y conectar los electrodos al circuito secundario del horno. Cada brazo tiene sección rectangular vacía; en la parte frontal está instalada una mordaza de soporte del electrodo mientras que en la parte posterior se encuentran las placas de sujeción de los bornes de los cables enfriados.

- **Circuito secundario con tubos enfriados:** tiene la función de conectar eléctricamente el transformador a los cables flexibles portacorriente conectados a los brazos portaelectrodos; está compuesto de conductores enfriados construidos en tubos de cobre.

- **Cables flexibles enfriados:** por cada fase se cuenta con dos cables, cada cable se compone de dos tubos flexibles aislados entre sí mediante un manguito perforado de goma que cubre los otros conductores. Los cables son enfriados por agua que corre en la cavidad del tubo de goma interno y son protegidos contra el calor y el desgaste.

- **Sistema de aspiración de humos:** los humos son recogidos mediante un ducto instalado sobre la bóveda del horno: dentro de horno se crea una presión ligeramente negativa que permite recoger y descargar los humos y el polvo producidos durante el proceso.

5.1.2 Proceso. El horno cuchara actúa como el regulador del ciclo de producción de la acería, allí se realiza el proceso de refino secundario del acero, es decir, se realiza un ajuste térmico a través de los electrodos y un ajuste de composición química asegurando la calidad del acero producido.

Las etapas del proceso son:

- **Recepción de la cuchara:** Después del colado tanto de horno eléctrico como de convertidores la cuchara es enviada por el carro entre naves hacia el horno cuchara. Una vez está allí se revisa que el nivel de acero no sobrepase las 3 hileras de ladrillo para evitar perforación de la cuchara, si esto es así, se bota acero hasta que la cuchara quede con el nivel adecuado.

  La cuchara es ubicada en el carro cuchara, se le conecta la agitación y se transporta debajo de la bóveda que está equipada con 3 electrodos de grafito con un transformador de arco trifásico.

- **Calentamiento del acero:** Una vez la cuchara está posicionada debajo de la bóveda se procede a bajarla con los electrodos para hacer el calentamiento del acero, este tiempo se conoce como power on. Para que el calentamiento sea homogéneo se debe asegurar que la agitación metalúrgica es la adecuada.

- **Tratamiento de la escoria:** es indispensable un buen tratamiento de la escoria para tener una calidad de acero adecuado, el objetivo es desoxidar y desulfurar el acero, crear un volumen adecuado de escoria que proteja el acero de la atmosfera y el refractario de la radiación del arco, esto se logra con la adición de carburo de calcio (20-30 Kg), escoria sintética (150-250 Kg) y cal (80-150 Kg).

- **Agitación con gas Inerte:** la inyección de gas inerte para este caso Argón permite la homogenización química y térmica del acero, además ayuda a la flotación de las inclusiones del acero.

- **Toma de temperatura y muestra:** transcurridos aproximadamente 8 minutos de arco se levantan los electrodos y se toma temperatura, si esta es superior a 1535ºC se toma la muestra de acero con muestreador de circonio para aceros trefilables y de aluminio para aceros sismoresistentes, la muestra es enviada por una capsula empujada por aire comprimido hacia el laboratorio.

- **Ajuste de composición química:** una vez se tiene el dato de la primera muestra se realiza el ajuste de la composición química, teniendo en cuenta la calidad a fabricar, sismoresistente o trefilable generalmente elementos como carbono con coquecillo, silicio con ferrosilicio, manganeso con ferrosilicomanganeso o ferromanganeso dependiendo del contenido de silicio, entre otros.

- **Liberación de la colada:** una vez la colada cumple con las especificaciones de temperatura y de composición química se envía hacia la máquina de colada, si es acero trefilable se inyecta ferrocalcio en cable para hacer flotar las inclusiones. Se adiciona polvo de cobertura para mantener la temperatura del acero y fluidizar la escoria.

Los objetivos principales del horno cuchara son el ajustar térmica y químicamente el acero, por eso es de importante cumplimiento los parámetros de composición química del acero y la temperatura de liberación de la colada, para garantizar un colado del acero sin inconvenientes. Cada uno de estos parámetros depende del tipo de acero a producir, aceros sismoresistentes o aceros de bajo y medio carbono (aceros trefilables).

5.2 ETAPA 2: MEDICIÓN Y SEGUIMIENTO AL TIEMPO DE PROCESAMIENTO DE COLADAS Y ETAPA 3: ACOMPAÑAMIENTO AL PROCESO EN EL HORNO CUCHARA

Para el desarrollo de este proyecto las etapas 2 y 3 se realizaron de forma conjunta durante un periodo comprendido entre los meses de junio a diciembre de 2018 con el fin de identificar y llevar a cabo algunas acciones que permitieran la mejora de las practicas operativas en el horno cuchara.

5.2.1 Instalación del Indicador. El l ritmo de producción de una acería que produce acero vía horno eléctrico (HEA) y convertidores (CVS) de manera simultánea está controlado por el horno cuchara (HC), esto depende del número de coladas que es capaz de procesar en un día, entre mayor sea este número menor será el tiempo de procesamiento de las coladas. Por esto surgió la necesidad de medir el tiempo de procesamiento de las coladas en el horno cuchara e identificar que variables que influyen en el aumento o disminución de este tiempo y proponer acciones que permitieran cumplir con las metas propuestas en producción.

La implementación de la medición de los tiempos de procesamiento de las coladas (TTT) y el seguimiento permanente a estos se estableció desde el mes de junio hasta diciembre. El apuntamiento de los datos colada a colada se realizó por los operadores en su planilla de producción mensual.

5.2.2 Seguimiento mes a mes. Durante los meses del estudio se recopilo la información promedio de los tiempos de procesamiento de las coladas en el horno cuchara y al terminar el mes se realizó un análisis para identificar las causas tanto internas como externas que afectaron el cumplimiento del indicador.

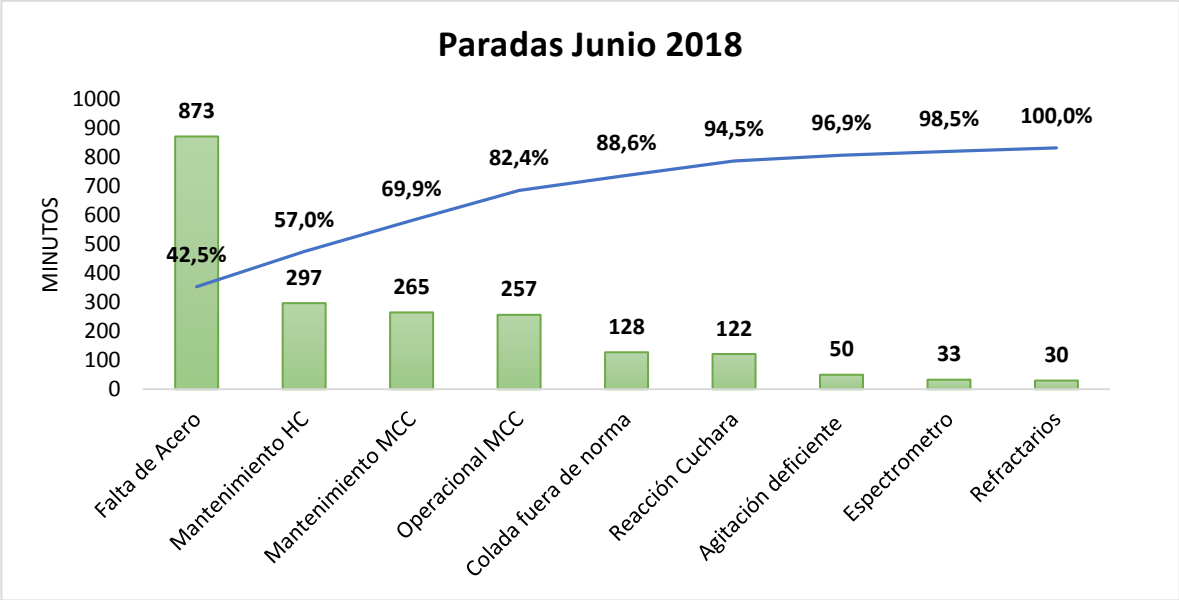
5.2.2.1 Junio 2018

Tabla 3. Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara junio 2018

Día	Nº de coladas	Promedio tiempo procesamiento de coladas
1	34	41,50
6	37	37,41
7	38	37,63
8	36	38,46
21	31	41,25
24	32	40,96
25	33	40,72
26	33	40,90
27	33	41,10
28	32	40,33
29	33	41,52
30	35	38,73
	Promedio	40,04

Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

Gráfica 1. Causas desviación TTT junio 2018



Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

5.2.2.2 Julio 2018

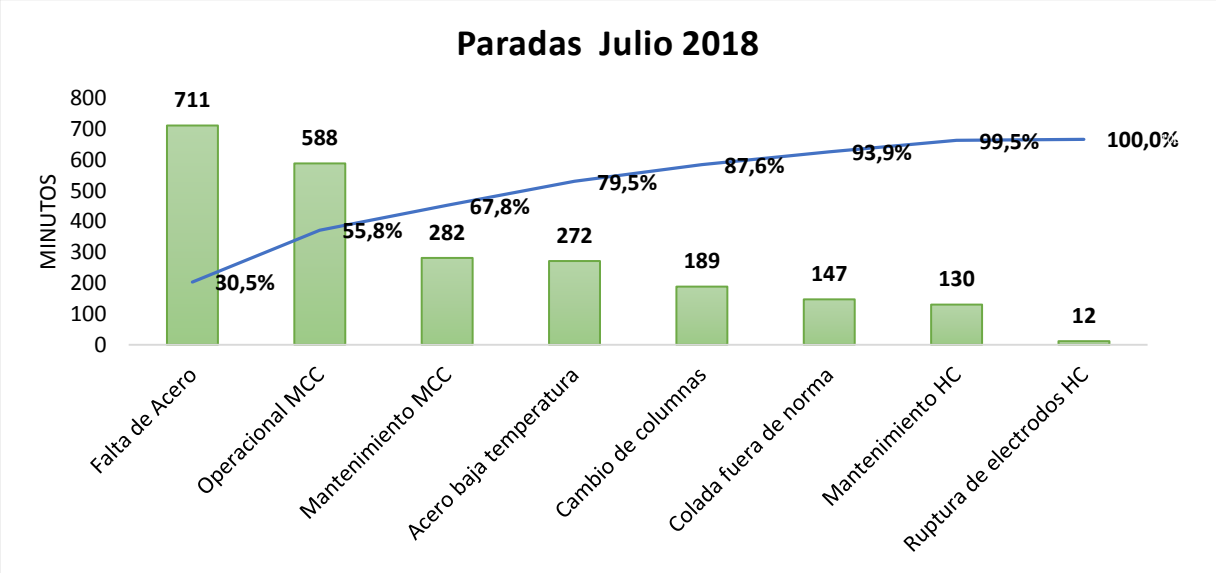
Tabla 4.Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara julio 2018

Día	Nº de coladas	Promedio tiempo procesamiento de coladas
1	37	37,30
2	38	37,05
10	36	38,95
16	34	40,00
17	39	36,20
18	35	39,78
19	37	37,43
20	38	37,08
21	38	37,32
22	33	41,13

Día	Nº de coladas	Promedio tiempo procesamiento de coladas
23	29	40,36
24	35	39,57
25	37	38,62
26	29	41,90
27	29	42,20
28	37	36,95
29	32	39,93
31	30	40,32
	Promedio	39,01

Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

Gráfica 2. Causas desviación TTT julio 2018



Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

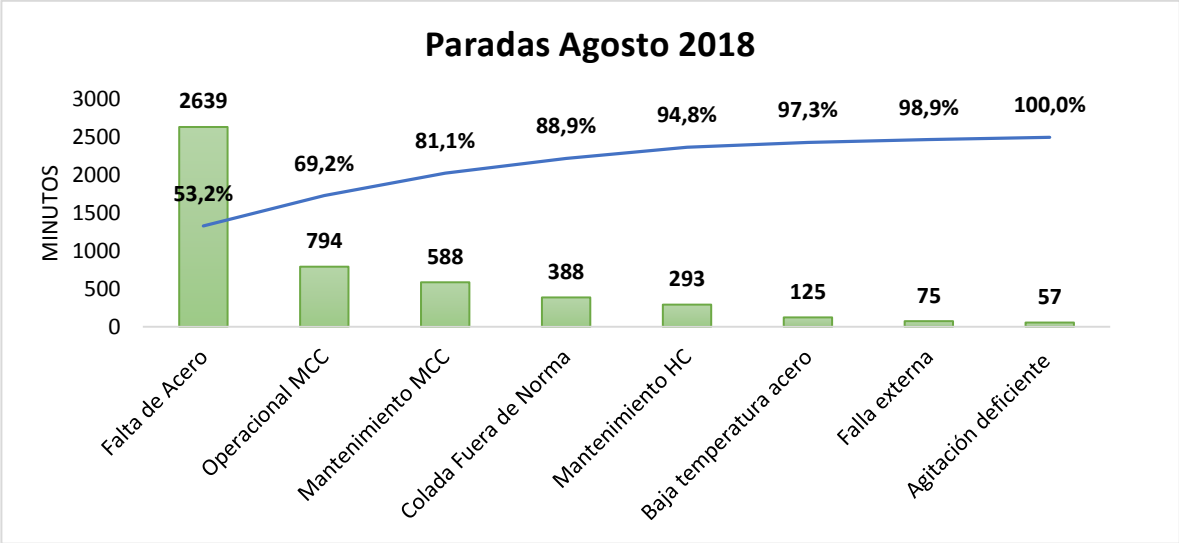
5.2.2.3 Agosto 2018

Tabla 5. Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara agosto 2018

Día	Nº de coladas	Promedio tiempo procesamiento de coladas
1	31	41,72
2	35	39,70
3	37	38,00
4	40	36,25
5	31	41,96
6	36	39,20
7	32	40,28
8	27	40,68
9	32	40,00
21	34	40,65
22	35	40,30
23	27	43,60
24	36	39,22
25	33	40,17
26	32	40,53
27	30	41,17
29	28	42,97
30	35	39,32
31	27	43,5
	Promedio	40,49

Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

Gráfica 3. Causas desviación TTT agosto 2018



Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

5.2.2.4 Septiembre 2018

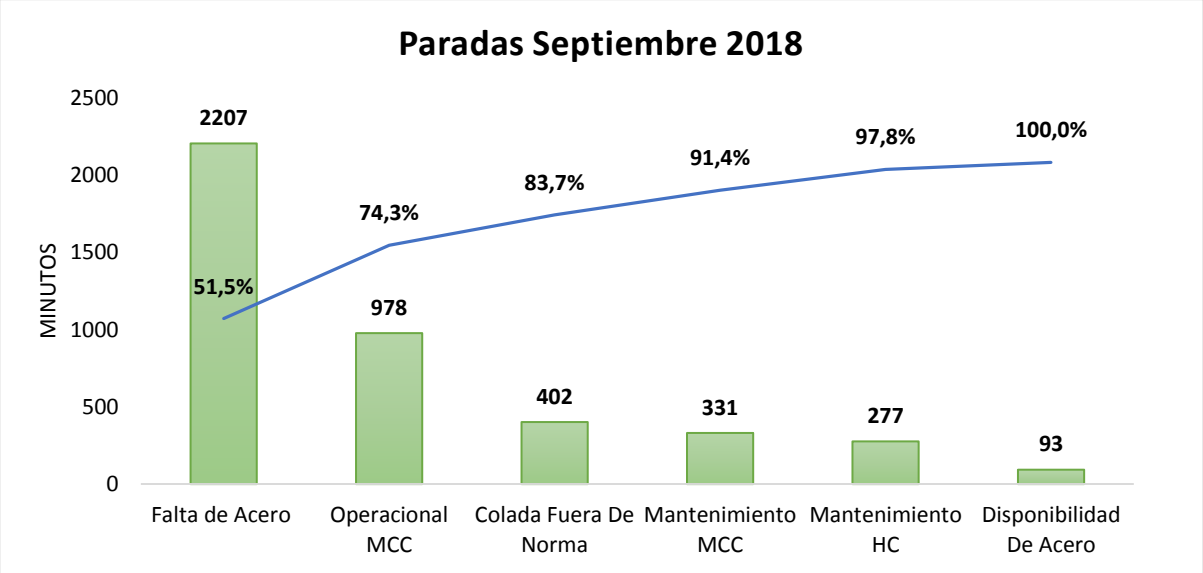
Tabla 6. Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara septiembre 2018

Día	Nº de coladas	Promedio tiempo procesamiento de coladas
1	32	41,62
2	33	42,10
3	33	40,87
4	33	41,10
7	34	39,85
13	30	42,72
14	36	37,38
16	35	39,70
17	32	42,35
18	35	39,55

Día	Nº de coladas	Promedio tiempo procesamiento de coladas
21	31	42,68
22	35	36,76
23	36	39,25
24	27	41,15
25	36	37,62
26	32	40,75
29	34	39,96
30	33	41,25
	Promedio	40,34

Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

Gráfica 4. Causas desviación TTT septiembre 2018



Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

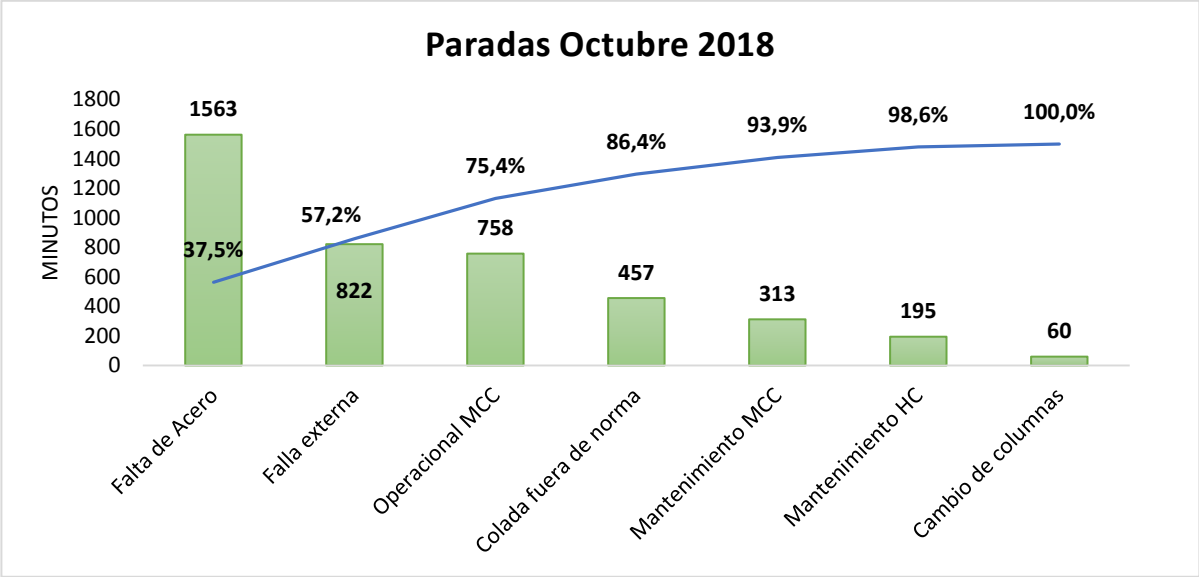
5.2.2.5 Octubre 2018

Tabla 7. Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara octubre 2018

Día	Nº de coladas	Promedio tiempo procesamiento de coladas
5	36	40,00
6	33	41,00
7	31	41,07
10	30	41,28
11	34	40,42
12	31	41,00
13	32	42,33
14	31	41,96
22	28	46,25
23	29	42,00
24	24	41,30
26	26	41,12
27	36	39,68
28	32	41,52
31	33	40,9
	Promedio	41,46

Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

Gráfica 5. Causas desviación TTT octubre 2018



Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

5.2.2.6 Noviembre 2018

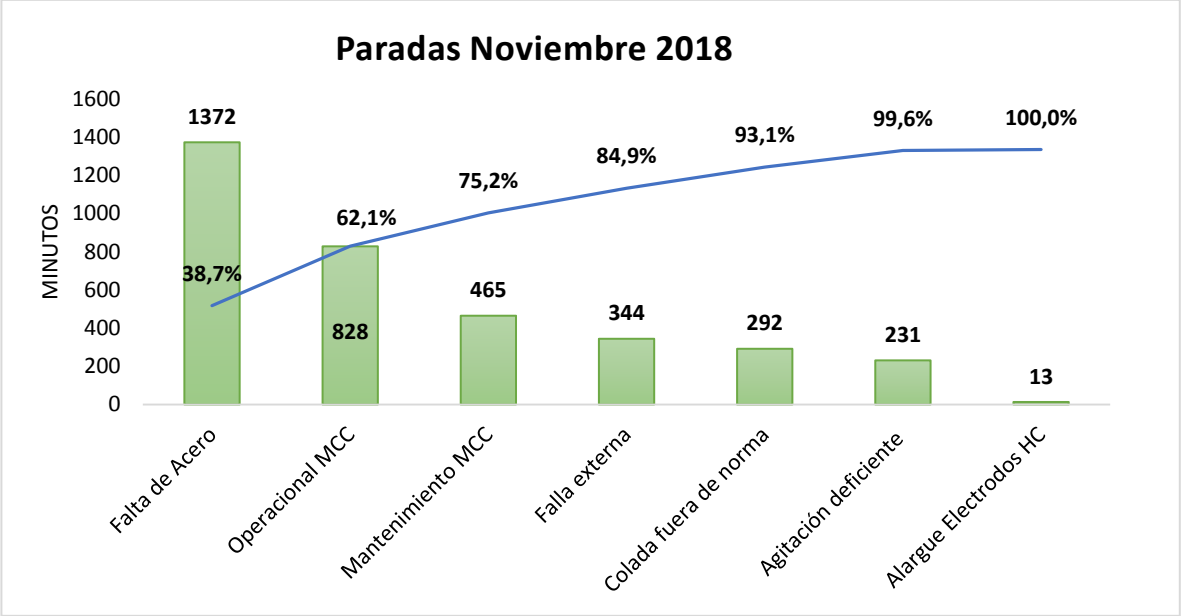
Tabla 8. Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara noviembre 2018

Día	Nº de coladas	Promedio tiempo procesamiento de coladas
1	36	39,25
3	30	41,30
4	38	37,13
5	35	39,75
6	35	39,50
7	38	37,46
8	33	40,68
10	31	41,80
11	33	41,60
12	32	41,36

Día	Nº de coladas	Promedio tiempo procesamiento de coladas
13	36	39,13
16	32	41,45
24	29	44,20
25	33	41,42
26	32	42,00
27	36	38,88
30	35	40,05
	Promedio	40,41

Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

Gráfica 6. Causas desviación TTT noviembre 2018



Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

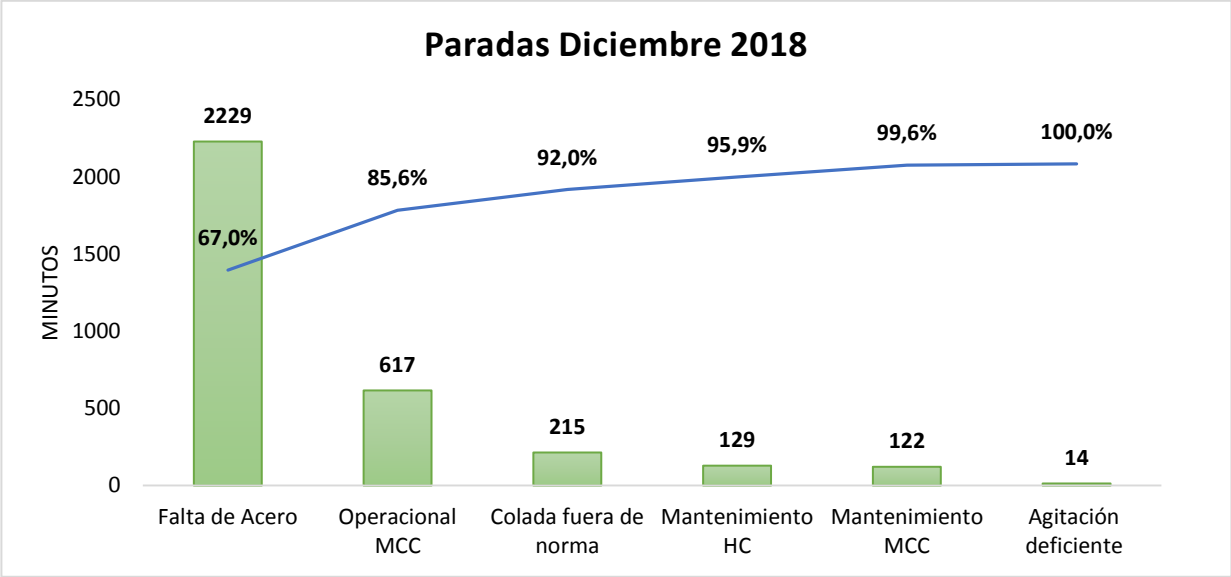
5.2.2.7 Diciembre 2018

Tabla 9. Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara diciembre 2018

Día	Nº de coladas	Promedio tiempo procesamiento de coladas
1	34	40,60
2	35	40,65
3	35	40,35
4	36	39,47
5	36	38,76
6	34	40,70
7	33	43,28
8	34	40,92
9	37	37,62
10	30	45,20
11	35	39,93
12	37	37,62
15	36	38,88
16	34	40,58
17	37	37,38
22	35	39,65
23	37	37,92
24	35	39,52
25	38	37,05
30	36	38,93
31	18	39,50
	Promedio	39,74

Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

Gráfica 7. Causas desviación TTT diciembre 2018



Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

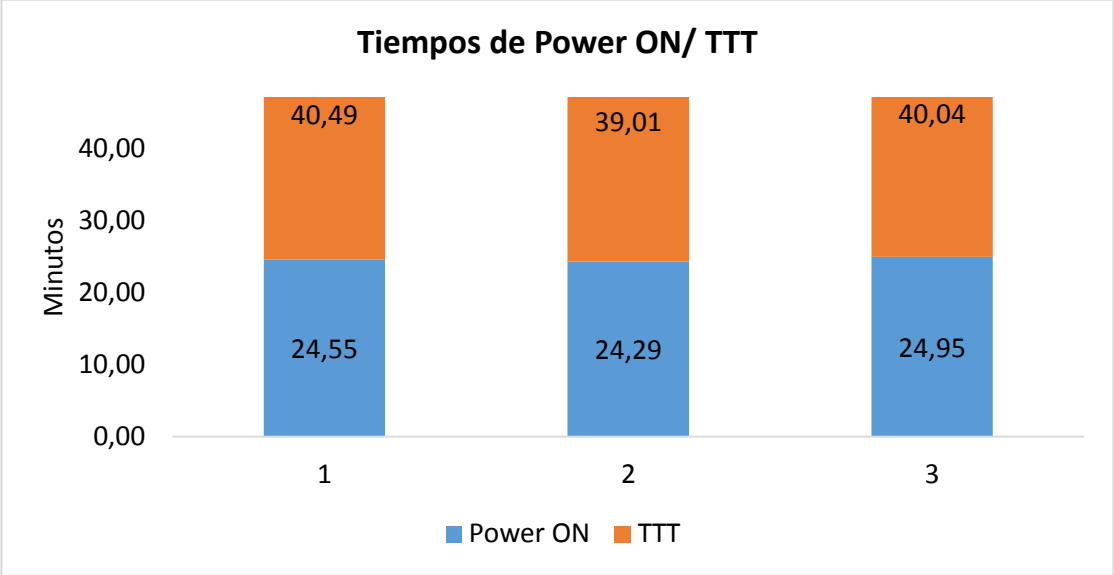
5.2.3 Acompañamiento al horno cuchara. El acompañamiento al proceso del horno cuchara tuvo dos focos, el primero fue identificación de oportunidades de mejora en las actividades desarrolladas en el horno cuchara para el procesamiento de las coladas y el segundo foco asegurar la obtención de un producto conforme a las especificaciones internas de la compañía con el fin de evitar problemas en el proceso posterior de laminación y que los costos del producto no excedan los esperados.

En este seguimiento se logró corroborar la información recolectada de las principales causas del aumento de los tiempos de procesamiento de las coladas. Una de las causas más comunes corresponde a las coladas fuera de norma, esta comprende dos puntos, coladas con bajo químico por lo que se requiere un tiempo mayor para hacer el ajuste de composición química y el segundo punto coladas con composición química por fuera de las especificaciones principalmente fósforo y carbono.

Los inconvenientes presentados con la agitación metalúrgica también representan una gran pérdida de tiempo debido a que si el acero no agita se hace necesario trasvasar el acero a una cuchara con un tapón poroso en buen estado para el tratamiento adecuado del acero.

Otra es las bajas temperaturas de colado del acero de convertidores, como se evidencia en la gráfica 8, donde se muestra dentro del tiempo de procesamiento de las coladas los tiempos de arco (Power ON) ocupan una gran fracción.

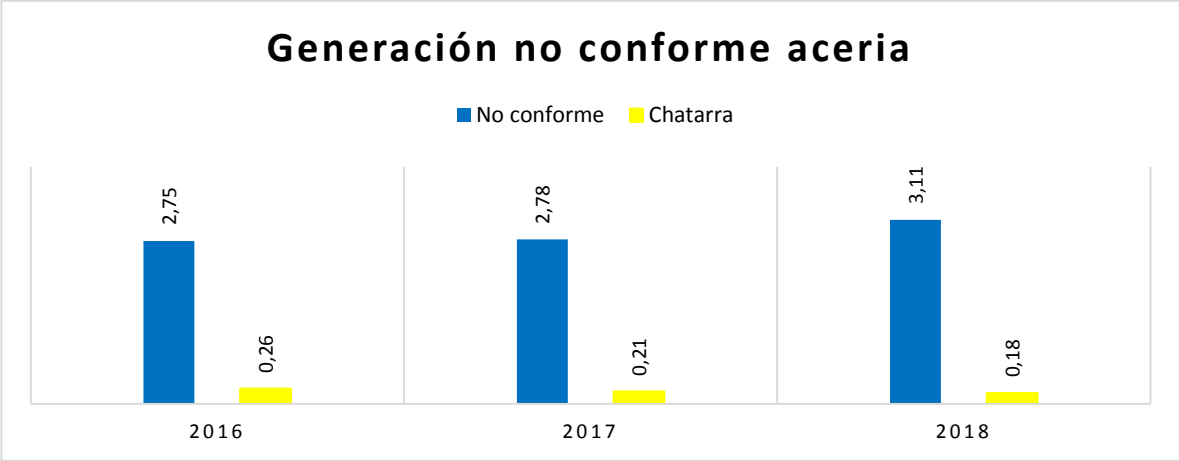
Gráfica 8. Tiempos iniciales Power ON/TTT



Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

El cambio y alargue de electrodos también afecta los tiempos a causa de que no se contaba con un procedimiento para realizar la actividad que estableciera parámetros importantes como el alistamiento de los materiales. Haciendo una revisión de los resultados obtenidos durante el 2016, 2017 y entre los meses de enero a mayo del 2018 del cumplimiento de la composición química conforme a las especificaciones establecidas por la compañía como se muestra en la gráfica 9, se encuentra la necesidad de establecer acciones encaminadas a disminuir el porcentaje de producto no conforme y el porcentaje de chatarra generado.

Gráfica 9. Comportamiento en la generación de producto no conforme



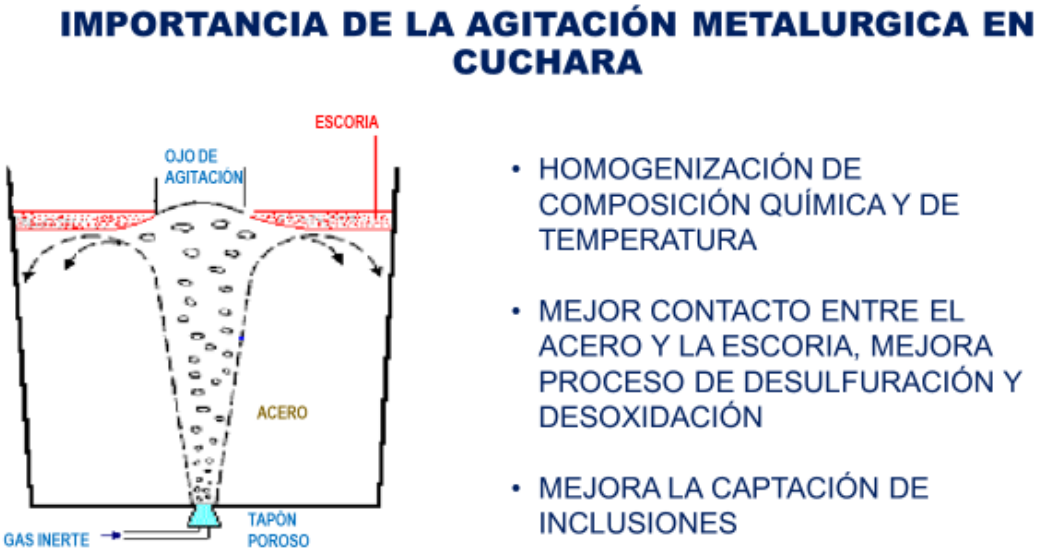
Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

5.2.4 Acciones generadas. El mantenimiento de los equipos y la falta de acero son variables incontrolables para este proyecto por lo que se tomaron acciones para disminuir el impacto de las practicas operacionales del horno cuchara en los tiempos de procesamiento de coladas.

- Para el caso de las coladas fuera de norma por baja o alta composición química se realizó para el primer caso una actualización de las tablas de adición de ferroaleaciones de convertidores y horno eléctrico ajustando la cantidad de aleantes adicionados con el objetivo de realizar ajustes mínimos de composición química, de acuerdo a las bases teóricas. Para el segundo caso se implementó en el mes de noviembre un procedimiento para realizar colado de las coladas altas en fósforo y carbono evitando la pérdida de tiempo y producción y generando la menor cantidad de chatarra.

- Las acciones generadas para la no agitación de las cucharas fueron una capacitación acerca de la importancia y los beneficios de la agitación metalúrgica en cuchara (figura 20) en horno eléctrico, convertidores y horno cuchara con todo el personal involucrado en la tarea. Y la otra acción fue regularizar un sistema de manejo de las cucharas, 4 en operación y 1 en espera para ser usada en cualquier eventualidad con las demás cucharas.

Figura 20. Guía de capacitación agitación metalúrgica



Fuente: Angélica Daniela Bautista Torres a partir de BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014. Pág. 156

- Uno de los inconvenientes evidenciados en el desarrollo del proyecto es la baja temperatura de colado en convertidores (1525ºC-1550ºC) propia del proceso por la importancia de evitar la re-fosforación del acero y por la cantidad de adiciones al acero (150kg-600kg) sumado a la granulometría de las ferroaleaciones que está entre los 30-50mm de diámetro. Por estas razones se implementó un pre-calentamiento de las ferroaleaciones principalmente ferrosilicomanganeso como se muestra en la figura 21, este consiste en un conjunto de flautas con una conexión de gas natural.

Figura 21. Calentamiento de ferroaleaciones



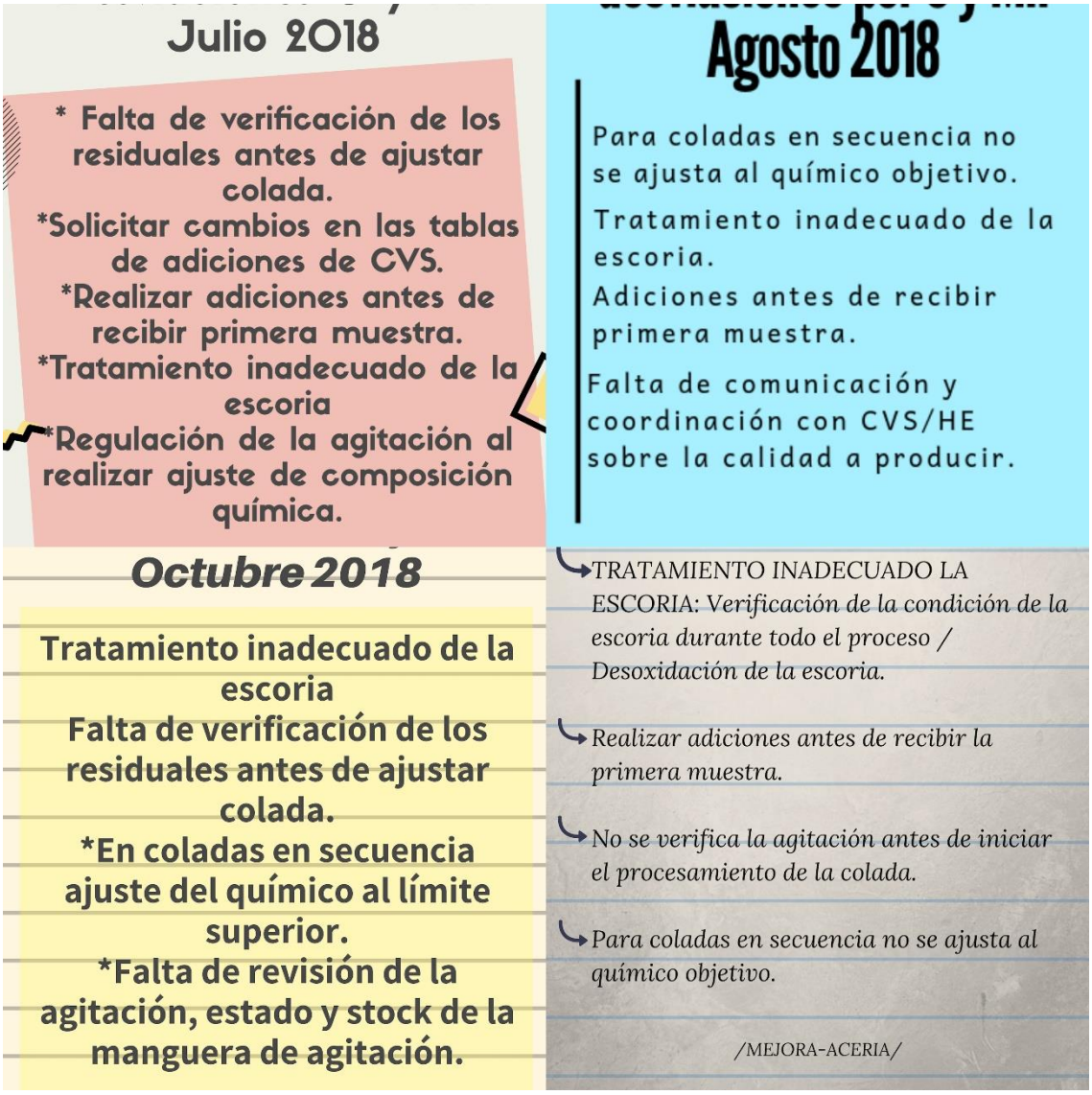
Fuente: Angélica Daniela Bautista Torres

- Para el cambio y alargue de electrodos se estableció un procedimiento para realizar las tareas y disminuir los tiempos en el alistamiento de los materiales.

- En el caso de la generación del producto no conforme se realizó un análisis de cada una de las coladas desviadas en conjunto para el operador que proceso la colada para encontrar la causa raíz de la desviación y plantear acciones preventivas para que las desviaciones no se volvieran a presentar. Terminado el mes se compartían las lecciones aprendidas para que todos los operadores estuvieran informados (figura 22).

  La principal causa de desviación fue el tratamiento de la escoria para la recuperación total de las ferroaleaciones adicionadas en los procesos anteriores de convertidores y horno eléctrico de arco adicionando las ferroaleaciones de forma apresurada sin el tratamiento correcto del acero además se realizaron capacitaciones en el procesamiento del acero para obtener óptimos resultados.

Figura 22. Recopilación de las lecciones aprendidas de las coladas con desvíos de composición química



Fuente: Angélica Daniela Bautista Torres

5.4 ETAPA 4: ACTUALIZACIÓN DE GUÍAS DE OPERACIÓN

La actualización de las guías de operación se realizó conforme se iban identificando las necesidades en el proceso.

5.4.1 Procesamiento de coladas. Se establece el orden de las actividades a ser llevadas a cabo para el procesamiento de las coladas. La verificación de la condición de la escoria para tomar las medidas adecuadas en cuanto las adiciones de escoria sintética y cal.

5.4.2 Cálculo y adición de ferroaleaciones. Para el cálculo de las adiciones se establecen las formulas y el uso de una herramienta en Excel para realizar el cálculo de forma rápida. Se hace mención a que todos los ajustes de composición se deben hacer después de obtener los análisis de laboratorio y de acuerdo a las especificaciones de cada calidad de acero.

5.4.3 Empalme y alargue de electrodos. Se realiza una guía de operación en conjunto con los operadores del horno cuchara donde se enuncian todos los materiales a ser usados para el armado de las columnas y se establece que deben estar armadas antes de realizar la tarea de cambio de columnas para disminuir los tiempos de parada.

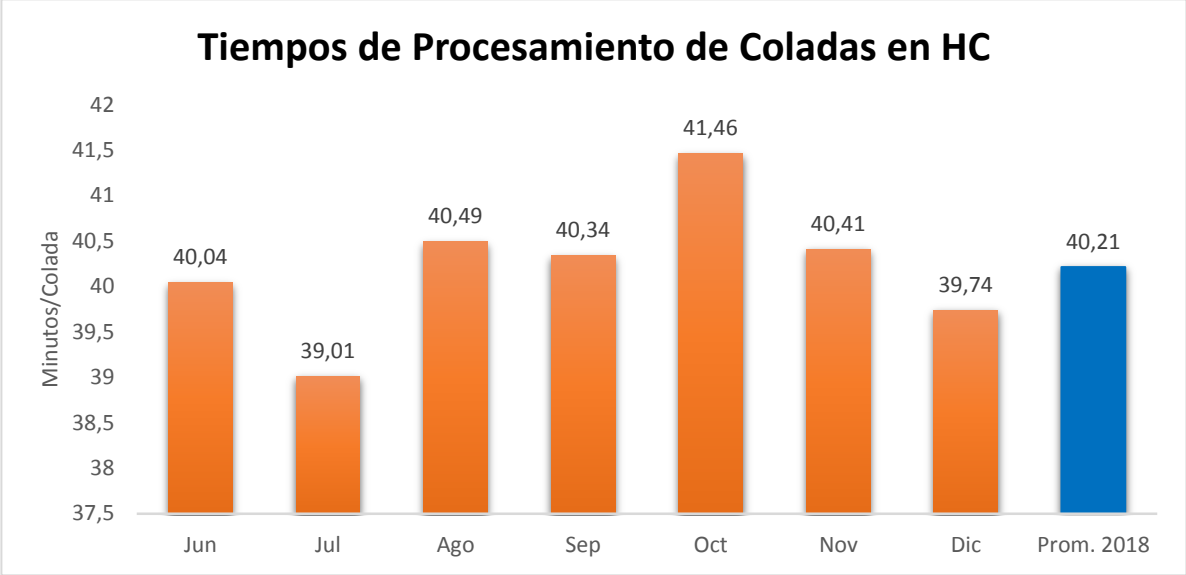
5.4.4 Tratamiento de coladas represadas. Teniendo en cuenta los problemas generados por la no conexión de la agitación metalúrgica se establece un intervalo de 10 minutos para realizar una prueba de agitación si por algún motivo las coladas no ingresan directamente al horno cuchara después de ser coladas.

5.4.5 Tratamiento de coladas con fósforo y carbono mayor. Se elabora en conjunto con los operadores de horno cuchara y máquina de colada continua un procedimiento que permita disminuir las paradas que generan las coladas altas en fósforo y carbono asegurando una baja generación de chatarra. Se establecen los contenidos máximos permitidos para preparar la colada alta en fósforo o carbono, la cantidad máxima de acero colado que no debe exceder la mitad del total de la colada y las maniobras necesarias para hacer una buena mezcla de la colada en el tundish.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

6.1 TIEMPOS DE PROCESAMIENTO DE LAS COLADAS

Gráfica 10. Tiempos de procesamiento de coladas en horno cuchara Jun-Dic 2018



Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

Con el seguimiento realizado durante el periodo de estudio se logró identificar que los tiempos de procesamiento de coladas en el horno cuchara a pesar de ser una variable propia del proceso de horno cuchara se ve afectada por agentes externos de la planta tales como los procesos anteriores (convertidores y horno eléctrico) como los procesos posteriores (máquina de colada continua). Todo esto indica que este indicador es un reflejo del flujo de producción de la acería y que recopila todos los problemas tanto operacionales como de mantenimiento del proceso.

Como ya se había mencionado en un principio este trabajo no se enfocó en los problemas de mantenimiento y los problemas operacionales de otras áreas que no fueran el horno cuchara y que no afectaran directamente las prácticas operacionales del horno cuchara, para objeto del estudio se denominaran problemas externos.

La instalación del indicador y el seguimiento de este mes a mes permitió identificar no solo los problemas internos del horno cuchara para los que se generaron acciones específicas si no que fue una herramienta importante para las demás áreas de la acería porque permitió identificar las falencias en el proceso y trabajar en conjunto para disminuirlas.

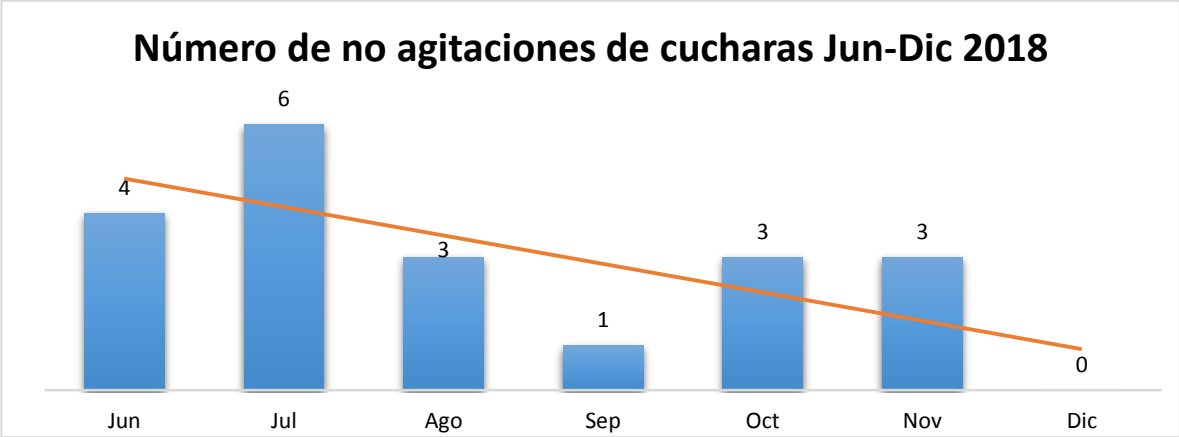
En cuanto a las desviaciones operativas del horno cuchara el indicador permitió cuantificar los tiempos perdidos y corroborar la información recolectada durante el acompañamiento al proceso. Esas desviaciones fueron principalmente en el ajuste de la composición química de liberación del acero líquido hacia máquina de colada, la no agitación de las cucharas, los altos tiempos de calentamiento del acero (power ON). Los resultados de las acciones generadas en el proceso se muestran en los siguientes ítems.

6.2 AGITACIÓN METALÚRGICA EN CUCHARA

La no agitación de cucharas en el horno cuchara era una desviación muy frecuente ocasionada principalmente por el desconocimiento de las personas de la importancia de la agitación metalúrgica durante el colado del acero para evitar obstrucciones del tapón poroso. Así como la prueba de agitación para verificar el estado del tapón durante el tiempo de espera de la cuchara antes de ser ingresada al horno cuchara, este tiempo puede ser entre 10 a 60 minutos dependiendo de la agilidad del proceso. Con las formaciones impartidas a las personas, la actualización y socialización de las guías de operación y la implementación del sistema de manejo de cucharas se logró disminuir notoriamente el número de cucharas que no agitaban de 4 promedio/mes en 2017 a 2,85 promedio/mes en el periodo de junio a diciembre del 2018 como se puede observar en la gráfica 11.

Estos resultados disminuyeron considerablemente las paradas por no agitación de cucharas durante el proceso en horno cuchara, esto además de mejorar las condiciones de operación disminuye los riesgos a los que se exponen los operadores en las tareas de trasvase del acero de una cuchara a otra, los costos por pérdidas de producción que oscilan entre 37,5 a 70 ton por cada evento presentado.

Gráfica 11. Resultados número de no agitaciones de cucharas



Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

6.3 CALENTAMIENTO DE FERROALEACIONES

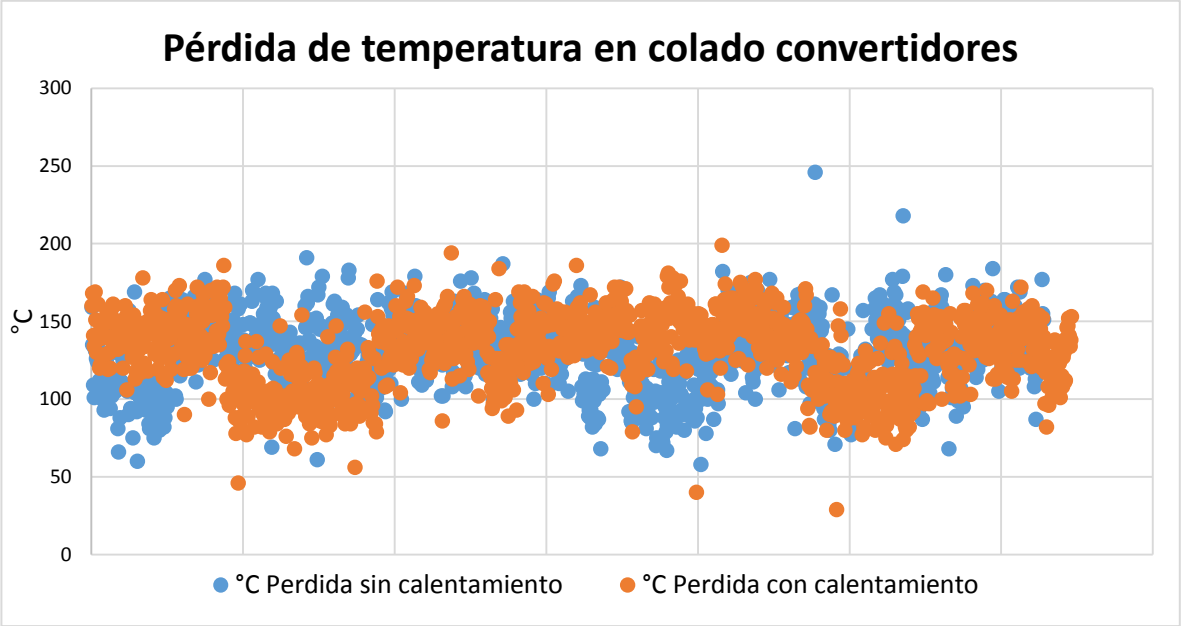
Durante calentamiento principalmente de ferrosilicomanganeso que es adicionado en convertidores en grandes cantidades se realizó un seguimiento y comparación de la temperatura perdida sin calentamiento donde los resultados promedio están alrededor de los 130ºC y la temperatura con calentamiento de las ferroaleaciones que en promedio también está entre los 130ºC, esto se evidencia en la gráfica 12.

Esto resultados demostraron que, aunque visualmente las ferroaleaciones están siendo calentadas no se obtienen los resultados esperados y necesarios para disminuir los tiempos de calentamiento del acero (power ON) y a su vez los tiempos de procesamiento de las coladas en el horno cuchara (TTT) como se observa en la gráfica 13, por el contrario, los tiempos aumentaron.

Analizando el problema desde otro punto, el tamaño de la ferroaleación es de consideración para que el calentamiento empleado tuviera una acción efectiva, además este tamaño afecta la solubilidad en el acero líquido absorbiendo una gran cantidad de energía (temperatura) para fundirse en el baño.

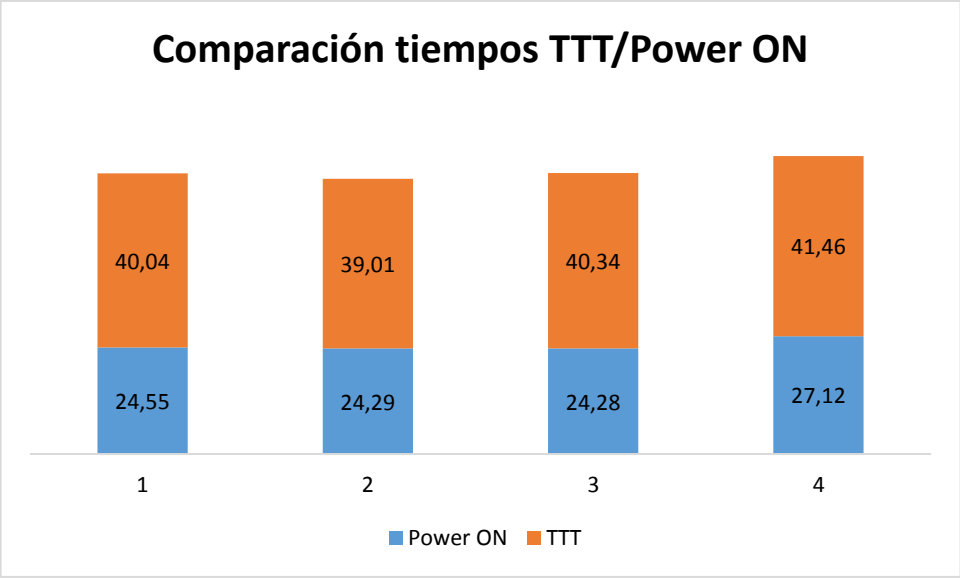
Con este análisis se propone adquirir las ferroaleaciones de un tamaño menor al actual y realizar pruebas con este material. Al momento de terminar esta investigación se estaba realizando el proceso de evaluación de compra de ferrosilicomanganeso.

Gráfica 12. Comparación de temperaturas de colado



Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

Gráfica 13. Comparación tiempos TTT/Power ON



Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

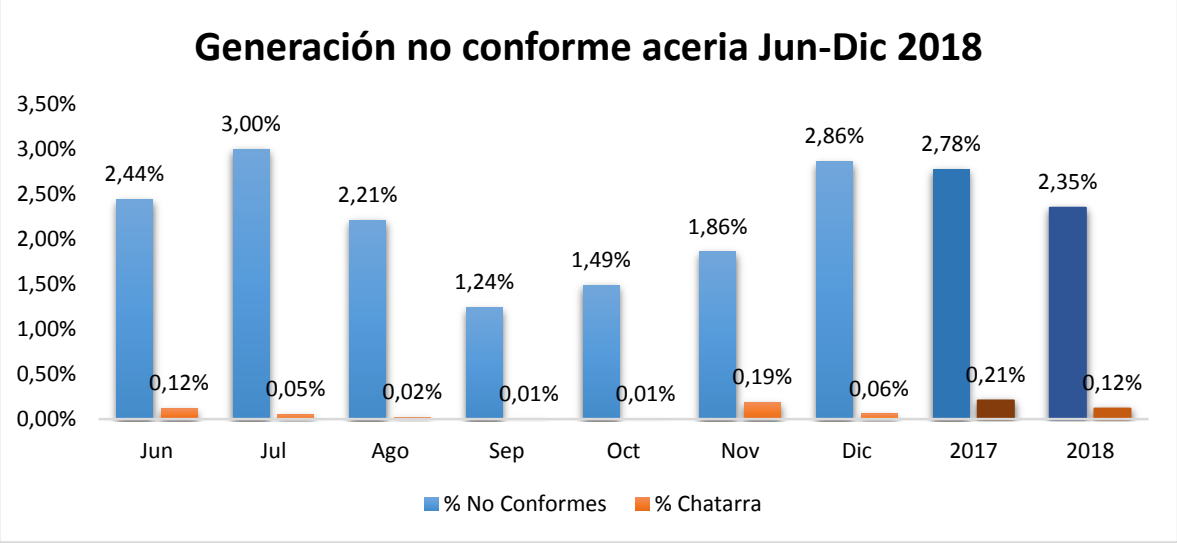
6.4 CONFORMIDAD QUÍMICA DE LA PALANQUILLA

El trabajo en conjunto con los operadores del horno cuchara para disminuir las desviaciones por composición química de la palanquilla arrojaron resultados importantes disminuyendo las desviaciones 2,78% en el 2017 a 2,35% en el 2018, así como la disminución de la generación de chatarra de 0,21% a 0,12% como se muestra en la gráfica 14.

Esto beneficia el proceso debido a que las coladas de carbono mayor ocasionan una parada del proceso, pues la norma es muy estricta al respecto y los altos contenidos de este elemento pueden afectar las propiedades del material. El resto de los elementos principalmente el manganeso y silicio al tener una composición química fuera de las especificaciones no afectan las propiedades del material, pero si aumentan los costos de la palanquilla, dependiendo del caso será el aumento, por lo tanto, se disminuyeron los costos de transformación del acero y se generó casi un 50% menos de chatarra en comparación con el año anterior.

Es importante resaltar además de los resultados el cambio en el procesamiento de las coladas, especialmente el punto del ajuste de composición química que se realiza después de recibir el primer dato de laboratorio y con el apoyo de una hoja de cálculo y no empíricamente como se realizaba anteriormente.

Gráfica 14. Generación de producto no conforme acería jun-dic 2018



Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

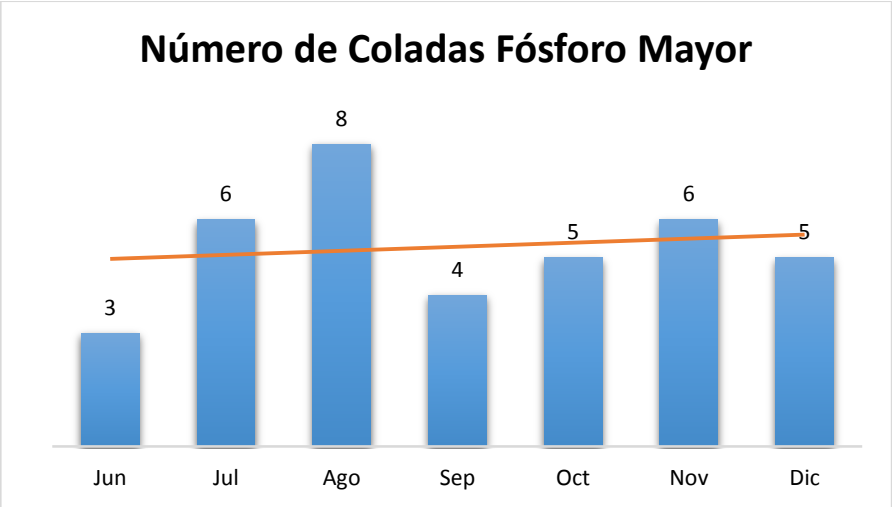
6.5 COLADAS CON FOSFORO MAYOR

La generación de coladas con fósforo mayor afecta considerablemente las condiciones normales de operación del horno cuchara porque estas ocasionan una parada de la máquina de colada, esta parada a su vez genera un represamiento de coladas que no es más que una acumulación de cucharas con acero líquido en espera a poder ser liberadas para la máquina de colada.

Este tiempo de espera para una colada puede ser de entre una a dos horas dependiendo del tiempo que se demore la maquina en reestablecer su operación y el tiempo para ingresar al horno cuchara desde el momento en que es colado. Esta espera genera que el acero se enfrié y el tiempo de calentamiento del acero sea mayor, así como la afectación a las cucharas de acero. Además, en este tiempo se podría generar ametalamiento en el tapón poroso y una posterior no agitación de la cuchara. Además de los costos que genera una pérdida de secuencia y la pérdida de producción de la acería.

Con este análisis y la información obtenida a lo largo del tiempo de estudio (gráfica 15) de que la tendencia de producción de estas coladas es de aumento, se requería estandarizar un procedimiento para estas coladas. Este procedimiento consiste básicamente en colar una cantidad del acero líquido fuera de especificación asegurando que se va a realizar una mezcla con la colada anterior y la colada siguiente para que baje el contenido ya sea fósforo o carbono generando una baja o nula cantidad de palanquilla.

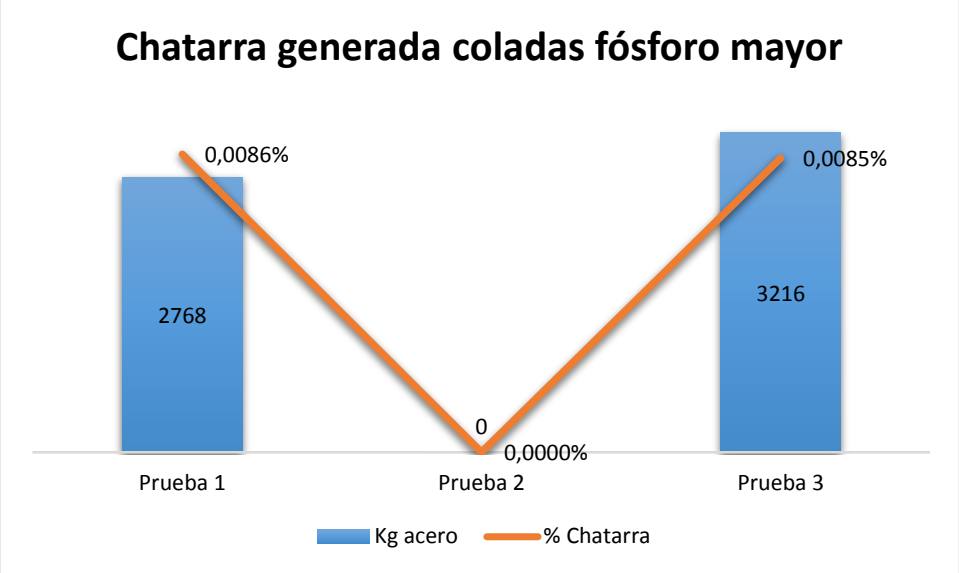
Gráfica 15. Generación de coladas con fósforo mayor



Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

Al poner en practica este procedimiento se generan contenidos de chatarra mínimos como se muestra en la gráfica 16 se disminuyen los costos y las pérdidas de producción por las paradas.

Gráfica 16. Resultados chatarra coladas fósforo mayor



Fuente: Acerías Paz del Rio S.A

7. CONCLUSIONES

- Los tiempos de procesamiento de coladas en el horno cuchara se ven afectados los procesos anteriores (convertidores y horno eléctrico) y posteriores (máquina de colada continua). Este indicador es un reflejo del flujo de producción de la acería.

- La implementación de herramientas de gestión permite encontrar desviaciones en el proceso y tomar acciones para eliminar o mitigar el impacto de estas en el proceso de producción.

- La actualización de procedimientos o guías de operación y la capacitación del personal en estas actividades críticas permite mantener un proceso más estandarizado y estable.

- La identificación de desviaciones, así como su posterior divulgación con todo el personal involucrado en la tarea en forma de lecciones aprendidas elimina de forma significativa las posibles fallas humanas que se puedan presentar en las actividades del procesamiento de las coladas.

- Con las actividades propuestas para la optimización de las prácticas operativas del horno cuchara se logró disminuir los eventos de agitación deficiente vía tapón poroso 4/mes a 2,85/mes.

- La generación de producto no conforme por composición química disminuyó de 2,78% a 2,35% de la producción mensual de palanquilla y la chatarra de 0,21% a 0,12%.

8. OPORTUNIDADES DE MEJORA

- Realizar pruebas con ferroaleaciones de menor granulometría o implementar un horno de inducción para la fusión de las ferroaleaciones, para facilitar su disolución en el baño y disminuir las pérdidas de temperatura en la adición de las mismas.

- Medir y controlar la temperatura de las cucharas antes del colado, esta debe estar entre los 700-800°C para asegurar una menor pérdida térmica por refractario.

- Disminuir los tiempos de respuesta de laboratorio para el análisis de las muestras de acero, para así reducir los tiempos de espera de los datos de composición química.

- Usar de manera permanente la mezcla de cal y escoria sintética definida para las necesidades del proceso.

- Desarrollar un proyecto para disminuir los desperdicios de las ferroaleaciones, generados principalmente por la adición manual de estas y adiciones excesivas por parte del personal.

- Establecer un control de proceso diario que permita tener una respuesta oportuna para la implementación de estrategias y la solución de fallas operativas en la planta.

BIBLIOGRAFIA

- BARKER, Keith J, et al. Steelmaking and Refining Volume. Pittsburgh. The AISE Steel Foundation. 1998. Pág. 669
- BARROS RIBEIRO, Delmar. Refino secundário dos aços. São Paulo. ABM. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014
- CARRO PAZ, Roberto; GONZÁLEZ GÓMEZ, Daniel. Administración de las operaciones. Universidad Nacional del Mar de Plata. 2015
- ENRIQUEZ BERCIANO, José Luis; TREMPS GUERRA, Enrique. Monografias sobre tecnología del acero. Parte I. Acería Eléctrica. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid. Nov 2009
- ENRIQUEZ BERCIANO, José Luis; TREMPS GUERRA, Enrique. Monografías sobre tecnología del acero. Parte II. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Nov 2007.
- GAVILANES, Dayana. Diseño de una escoria sintética desulfurante para el proceso de afino en el horno cuchara de una acería. Tesis de ingeniería química. Quito.: Escuela Politécnica Nacional. 2016. pág. 7-15
- MAGNESITA. [Presentación ppt] Tema I Refractarios empleados en la acería. [Consultado el 20 de diciembre del 2018]
- MENDEZ, Carlos. Diagnóstico y evaluación del proceso de colada continua mediante la ruta de calidad en la empresa ANDEC S.A. Tesis de ingeniería industrial. Guayaquil.: Universidad de Guayaquil. 2016.
- UP COMMONS. Proceso de fabricación del acero [en línea] <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3319/55868-7.pdf?sequence=7&isAllowed=y> [consultado 24 de enero de 2019]
- VILLA, Enrico. Metalurgia en cuchara. 2011 [Presentación ppt] [Consultado el 19 de diciembre 2018]
- WORDPRESS [en línea]. [Consulta 02 de febrero de 2019] Disponible en https://xiderexdotcomdotmz.wordpress.com/2016/01/12/que-es-la-colada-continua/
- XUNTA. [En línea]. [Consultado 02 de febrero de 2019]. Disponible en: https://www.edu.xunta.es/espazoAbalar/files/datos/1464947174/contido/422_horno_alto.htlm

ANEXOS

Anexo A. Registro fotográfico horno cuchara Acerías Paz del Río S.A

Figura 23. Horno cuchara Acerías Paz del Río S.A



Figura 24. Plataforma de trabajo horno cuchara Acerías Paz del Río S.A



Fuente: Angélica Daniela Bautista Torres

Anexo B. Registro fotografico materias y equipos de horno cuchara Acerías Paz del Río S.A

Figura 25. Ferroaleaciones. Lado derecho ferrosilicomanganeso. Lado derecho ferrosilicio



Fuente: Angélica Daniela Bautista Torres

Figura 26. Cuchara para transporte de acero liquido



Fuente: Angélica Daniela Bautista Torres

Figura 27. Mecanismo de tapón poroso para cucharas de acero líquido



Fuente: Fabián Naranjo. RHI Magnesita

Anexo C. Registro fotográfico actividades realizadas en el horno cuchara Acerías Paz del Río S.A

Figura 28. Actividad de empalme de electrodos



Fuente: Gustavo García. Facilitador horno cuchara

Figura 29. Adición de ferroaleaciones



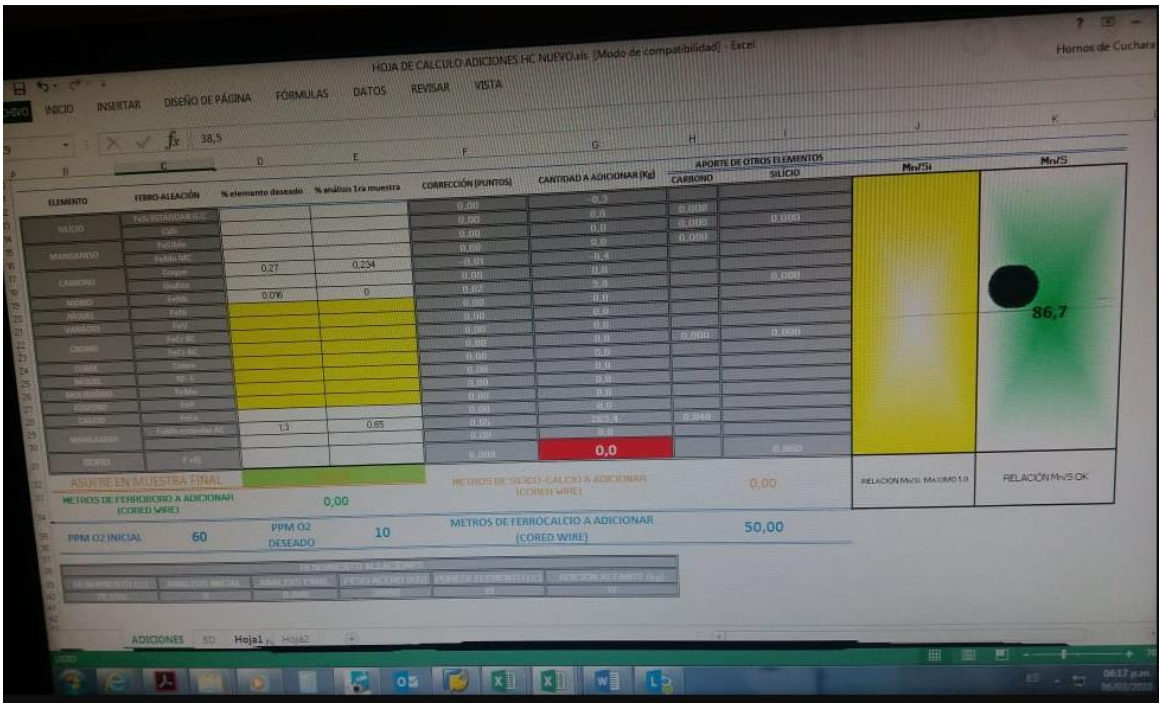
Fuente: Angélica Daniela Bautista Torres

Figura 30. Toma de temperatura



Fuente: Angélica Daniela Bautista Torres

Anexo D. Hoja de cálculo de adiciones en horno cuchara Acerías Paz del Río S.A



Fuente: Documentación Acerías Paz del Rio S.A

Anexo E. Formato Guía de operación Acerías Paz del Rio S.A

2. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES

1. Verificación de la condición de represamiento

Cómo:

- ✓ Verificar el tiempo de residencia del acero líquido en cuchara (tiempo de permanencia desde fin de colado Convertidores/ Horno Eléctrico hasta inicio proceso Horno de Cuchara), si este es **mayor** o **igual** a **50 minutos** la colada se considera represada.

Para coladas en secuencia evaluar con el **Operador líder MCC** la posibilidad de cerrar una línea o desocupar el tundish.
Hacer rotación de las coladas para evitar la formación de fondos cuando: solo se esta trabajando con el Horno Eléctrico y se quiere hacer stock de coladas para arrancar MCC, hay problemas en MCC y quedaron coladas por pasar en la máquina.

Quién: Operador Experto Horno Cuchara

Fuente: Documentación Acerías Paz del Rio S.A