

UNA REVISIÓN CRÍTICA DE DESARROLLOS TECNOLÓGICOS RECIENTES EN HORNOS ELÉCTRICOS DE ARCO*

Jorge Madias¹
Sara Hornby²
Francisco Torre³

Resumo

Los hornos eléctricos de arco han sido motivo de una aplicación dinámica de nuevas tecnologías en lo que va de este siglo. La preparación de la chatarra y el uso de materiales de carga alternativos han dado lugar a la concepción de nuevos equipamientos y experiencias en todo el mundo. Surgen nuevos conceptos para el precalentamiento de la chatarra, superando las limitaciones de mantenimiento y ambientales de los conceptos iniciales y mejorando su performance energética. El aporte de energía química para la fusión supera sus límites año a año, requiriendo el desarrollo de equipamiento capaz de una acción rápida y precisa con grandes caudales de gases y sólidos inyectados. Existen nuevas herramientas para eliminar los riesgos de seguridad en la plataforma del horno, haciendo uso de sistemas de enfriamiento más seguros y duraderos, robots, automatización de la operación del agujero de colado, y puertas de escoria controladas desde el púlpito.

Palavras-chave: Forno eléctrico a arco; Metálicos; Precalentamiento de chatarra; Seguridad.

A CRITICAL REVIEW OF RECENT TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS IN ELECTRIC ARC FURNACES

Abstract

Electric arc furnaces have given space for a dynamic application of new technologies during this century. New ways for scrap preparation and alternative iron sources gave place to the conception of new equipment and experiences worldwide. Scrap preheating is the subject of changes overcoming previous limitations in maintenance and environment and promoting a better energy performance. Chemical energy for melting increases its action, requiring the development of equipment capable of rapid and precise application with large flowrate of gases and solids. New tools are offered to eliminate risks in the EAF working platform, making use of safer and long-lasting cooling systems, robots, automation of tap-hole operation, and automatic slag doors.

Keywords: Electric arc furnace; Metallics; Scrap reheating; Safety.

¹ Metallurgical Engineer, Director, metallon, San Nicolas, Buenos Aires, Argentina.

² PhD, Principal, Global Strategic Solutions Inc., Charlotte, North Carolina, USA.

³ Chemical Engineer, Consultant, Facts Ingeniería, Rosario, Santa Fe, Argentina.

1 INTRODUÇÃO

En los últimos años el porcentaje de acero por la vía horno eléctrico ha disminuido (no así la cantidad total). Pero en la medida que en China y otros países emergentes comience a haber más disponibilidad de chatarra, y en el marco de que las emisiones de CO₂ de esos países comiencen a restringirse, resulta lógico esperar un incremento de la producción por esta vía. La Agencia Internacional de la Energía ha elaborado pronósticos sobre la ruta de proceso y el consumo de metálicos hasta el año 2050, previendo una participación de las acerías eléctricas cercana al 50% [1].

Esto plantea un desafío al desarrollo de tecnologías en este campo, para aumentar la eficiencia térmica del horno eléctrico, incrementar su productividad, disminuir su costo operativo y mejorar su performance ambiental.

En este trabajo se detallan algunos avances recientes, desde la carga metálica, el precalentamiento de chatarra y la carga caliente de hierro esponja, el control del proceso y la seguridad en la plataforma.

2 CARGA METÁLICA

2.1 Chatarra

Es y continuará siendo el principal componente de la carga metálica de los hornos eléctricos. Su preparación previa tiene incidencia en la eficiencia del horno eléctrico, y particularmente sobre los consumos específicos de energía, cal, electrodos y refractarios, así como también en el rendimiento metálico. En este sentido se continúan incorporando equipos de fragmentación de chatarra y de prensado, tanto en la siderurgia como en empresas procesadoras de chatarra [2].

Para disminuir la presencia de contaminantes y metales no ferrosos en la chatarra, una vez fragmentada, se han implementado sistemas con diferentes métodos de analizar el cobre (fluorescencia de rayos X de alta velocidad, análisis rápido por activación de neutrones gamma). El primero analiza cada pieza de chatarra y define en base a criterios preestablecidos si esa pieza debe separarse; en caso afirmativo, al momento de caer de la cinta es eyectado mediante válvulas de aire comprimido de alta potencia [2]. El segundo sistema analiza mediante el sistema de neutrones gama el conjunto del material que pasa; no puede usarse para una separación en línea, pero permite tener una idea de la influencia sobre la composición química de los distintos tipos de chatarra que ingresan a la fragmentadora [2]. Con estos se asegura un tenor de cobre menor de 0,20%.

El desmantelamiento previo de los automóviles da excelentes resultados en cuando a la eliminación de elementos residuales y contaminantes. Un ejemplo extremo es la planta de WARC (West Japan Auto Recycle Co., Ltd.). Los automóviles se desmantelan totalmente, eliminando el problema de la disposición del residuo que se genera en las fragmentadoras [3]. La planta puede procesar 1000 vehículos mensuales, operando con un turno de ocho horas. Se desmantela un auto cada 8,5 minutos.

2.2 Hierro esponja

La producción de esta forma de hierro primario que está mayoritariamente destinada a la carga metálica de los hornos eléctricos continúa en aumento, habiendo alcanzado en 2014 74,6 Mt. Se estima que cubre un 15 % de las necesidades de

metálicos en los hornos eléctrico de arco. Es sabido que la fusión del hierro esponja consume más energía eléctrica que la de la chatarra, debido a la presencia de la ganga en el mineral original, que no se separa durante la reducción, proceso que se realiza en estado sólido. Sin embargo, una metalización alta, un cierto nivel de carbono en el hierro esponja/briqueta y una operación adecuada del horno eléctrico ayudan a disminuir el impacto de la ganga [4].

Entre los cambios tecnológicos que han tenido lugar en los últimos años en la producción y aplicación del hierro esponja cabe mencionar:

- Reforma del gas natural en el horno, que permite bajar el costo de inversión en una planta de este tipo, haciendo factible la instalación de miniplantas
- Uso de diversos tipos de gases además de gas natural (gas de unidades Corex, gas de carbón, eventualmente gas de coquería)
- Reconsideración de la carga caliente, practicada en los años 70 en la unidad PUROFER de Cosigua, ahora bajo otras características.

2.3 Arrabio sólido

Es habitual que quienes disponen de esta materia prima a un precio aceptable la utilicen en un pequeño porcentaje, del orden del 5%, por las ventajas que presenta en cuanto a mejora de la densidad de carga, aporte de carbono, bajos residuales, etc. El uso de este tipo de carga metálica en porcentaje elevado es una práctica usual en Brasil, debido a la disponibilidad de arrabio proveniente de altos hornos independientes a carbón vegetal. Dependiendo de las circunstancias, ese porcentaje oscila entre el 10 y el 40%. Se estima que se produce un ahorro de energía eléctrica del orden de unos 3 kWh/t acero crudo, por cada por ciento adicionado en la carga. También consumen arrabio sólido diversas acerías eléctricas que elaboran acero para productos planos en Estados Unidos, para tener un menor contenido de cobre y otros elementos residuales.

2.4 Arrabio líquido

Los usuarios más habituales de esta materia prima son los hornos eléctricos que se han instalado en varias acerías integradas en China y en unas pocas de Europa, América del Norte y Brasil. En el caso de China, esta práctica ha permitido superar problemas de alto costo de la chatarra y de precariedad en el suministro de energía eléctrica [5]. También hay acerías eléctricas que han incorporado mini altos hornos, como sucede en China [6] y Brasil. El ahorro de energía eléctrica se estima en unos 3 - 5 kWh/t por cada uno por ciento de arrabio líquido adicionado, siempre que la proporción utilizada sea superior al 20%.

Los métodos de carga usuales son mediante el vuelco directo de una cuchara sobre el fondo líquido del horno; el vuelco sobre agujeros perforados mediante los electrodos en la chatarra cargada previamente; mediante un canal a través de la puerta de escoria o en forma continua a través de un canal que ingresa al horno por un lateral, en los hornos con carga continua de chatarra precalentada [7].

El uso de alto porcentaje de arrabio líquido implica disponer de una alta capacidad de oxidación del arrabio ingresado. Esto ha llevado a soluciones extremas que implican el soplo con lanza de oxígeno, de manera semejante a los convertidores. Por ejemplo, el horno llamado comercialmente CONARC (CONverter ARCing). Consiste de dos carcasas gemelas, una instalación para inyección de oxígeno mediante lanza (puede tener dos lanzas de oxígeno estacionarias o una que atienda

a las dos carcasas) y una instalación para aplicación de arco eléctrico, que posee brazos porta electrodos que giran y pueden alcanzar a las dos carcasas [8]. Cabe mencionar que las ventajas que poseen los hornos eléctricos de arco con respecto a las emisiones de CO₂ se diluyen cuando se utilizan altos porcentajes de arrabio sólido o líquido, ya que crece significativamente la formación de CO y CO₂. Un benchmarking de 150 hornos eléctricos de arco permite evaluar la influencia de las materias primas y su estado sobre el consumo específico de energía eléctrica. Los hornos que cargan porcentajes importantes de arrabio líquido son los que tienen los menores consumos. Los siguen los hornos que cargan arrabio sólido, junto con los mejores hornos que cargan alto porcentaje de chatarra. En una franja intermedia se ubican hornos que cargan alto porcentaje de chatarra y hornos con carga caliente de hierro esponja. Tienen consumos más elevados los hornos con alto porcentaje de chatarra de menor performance y luego se ubican los hornos que cargan hierro esponja a temperatura ambiente, ver figura 1 [4].

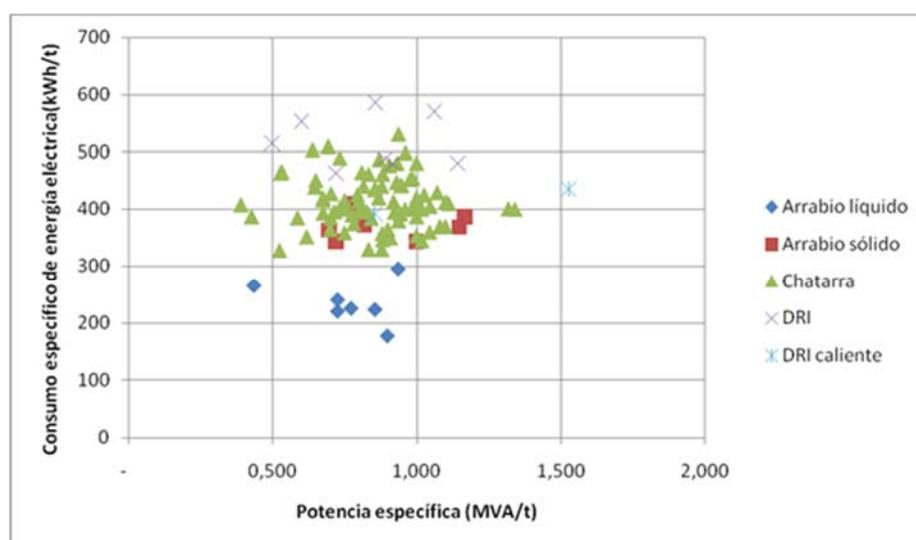


Figura 1. Consumo específico de energía eléctrica en función de la potencia específica del horno, para cada materia prima principal y su estado [4].

3. CARGA

3.1 Programas de optimización de la carga

Se han desarrollado diversos modelos de cálculo de carga, que manteniendo ciertas restricciones de calidad, permiten minimizar el costo de la misma [9]. Estos programas han sido desarrollados o mejorados por proveedores como Management Science Associates Inc. (MSA), Tube City IMS (TCIMS), fabricantes de hornos eléctricos y proveedores de automatización, o por las propias siderúrgicas. Estos modelos consideran los costos de los diferentes metálicos, su valor en uso y la composición química del acero líquido. Algunos de ellos ofrecen estrategias de compra. Factores de mercado, más allá del costo y el valor en uso, influyen las decisiones de compra y pueden representarse en estos programas: Oferta y demanda regional, historia del proveedor, salvaguardia de futuros suministros, generación de chatarra interna y/o suministro de metálicos alternativos; políticas de la empresa en cuanto a suministros, precios y ganancias; incapacidad de la planta para degradar productos para usos secundarios; el deseo de garantizar el cumplimiento de las especificaciones sin problemas, son factores que pueden

promover la decisión de utilizar metálicos de alta calidad aunque haya opciones de menor costo.

3.2 Preparación automática de cestas

Desde junio de 2012 se utiliza en el horno eléctrico de 150 t de Riva SAM, Neuves Maisons, Francia, un nuevo sistema de carga de chatarra desarrollado por Siemens, denominado comercialmente Chargeopt. Permite automatizar totalmente y optimizar los movimientos de la grúa durante la carga. Los patrones de movimiento repetibles con precisión acortan los ciclos de carga, reducen la necesidad de mantenimiento y aumentan la seguridad de funcionamiento. El operador de la planta dispone de un sistema de automatización homogéneo desde el depósito de chatarra hasta el horno de arco eléctrico. El control puede efectuarlo el jefe de turno, desde la sala de control [10].

3.3 Precalentamiento de la chatarra: avances recientes

Hasta la fecha el estándar para los nuevos hornos eléctricos de arco continúa siendo un horno con carga de chatarra a temperatura ambiente, mediante cestas. Sin embargo en situaciones específicas los hornos con precalentamiento de chatarra han atraído interés. Hay cerca de 60 hornos en operación (35 Consteel, 19 *shaft furnaces* y 4 Eco-Arc). El más difundido consiste en la carga continua con precalentamiento mediante el calor de los gases de escape en contra corriente; los dos restantes se basan en el precalentamiento en cubas.

Los primeros hornos con estas tecnologías arrancaron cerca de 1990. Debieron superar diversos obstáculos hasta convertirse en propuestas atractivas para la inversión. Inicialmente, los avances en la disminución del consumo específico de energía en los hornos convencionales dejaban menos espacio para la recuperación. A su vez, la introducción de equipos especiales para el precalentamiento implicaba mayor costo de inversión y de mantenimiento. Surgieron problemas ambientales por el procesamiento de la chatarra dentro de un rango de temperaturas favorable a la formación de dioxinas. Debieron hacerse modificaciones en los diseños para mejorar la disponibilidad de los hornos [11]. Se estima por una fuente independiente que la recuperación de energía es de entre 30 y 50 KWh/t. En [12] se presenta un análisis más detallado de las dos tecnologías dominantes.

En la actualidad se están difundiendo conceptos de hornos con precalentamiento que superarían la performance en materia de recuperación de energía y bajo consumo específico de los actuales. Uno de ellos se conoce como "Consteel evolution", y se caracteriza por el uso de quemadores en el túnel de precalentamiento de la chatarra e inyectores para post combustión en el horno. En el nuevo sistema, el túnel de precalentamiento estaría dividido en dos secciones. La primera tendrá quemadores de alta eficiencia montados cerca de la carga que pasa por debajo y estará localizada aguas arriba de la succión de gas (figura 2).

En la segunda sección se completa la combustión del gas de escape del horno. Se le asignará un tamaño que permita bajar la velocidad del gas proveniente del horno, dando tiempo para que se completen las reacciones de post combustión y la separación del polvo, cuya parte más gruesa sería atrapada por la carga y se reciclaría al horno [13]. Podrían introducirse analizadores de gas en el ingreso y salida de este túnel para regular el ingreso de aire al mismo en función del análisis de los gases. No hay hasta el momento referencias industriales de este concepto.

El otro concepto se conoce bajo la denominación de “Simetal EAF Quantum”. Es una extensión de la idea básica del “*shaft furnace*”, en la que se opta por la carga de la cuba mediante un carro elevador y un chute (figura 3), eliminando cestas y grúa. Para eliminar el tiempo con horno desconectado utiliza un sistema de sifón para el sangrado.

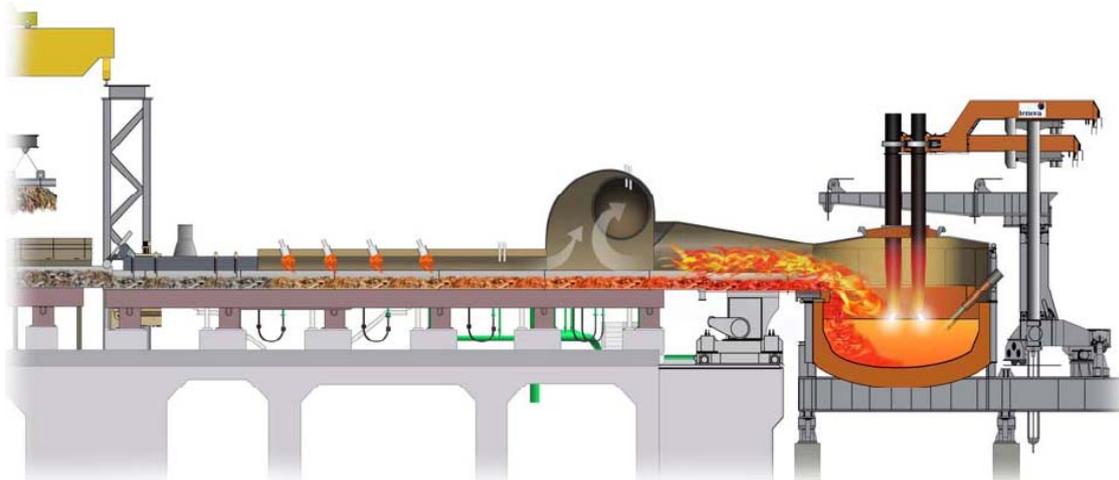


Figura 2. Concepto “Consteel evolution”. Se añade una sección de túnel de precalentamiento de la carga metálica mediante quemadores y se diseña el tramo del túnel que conduce al horno de manera de permitir que se complete la combustión del gas de escape del horno y el depósito de las partículas gruesas del polvo sobre la chatarra [13].

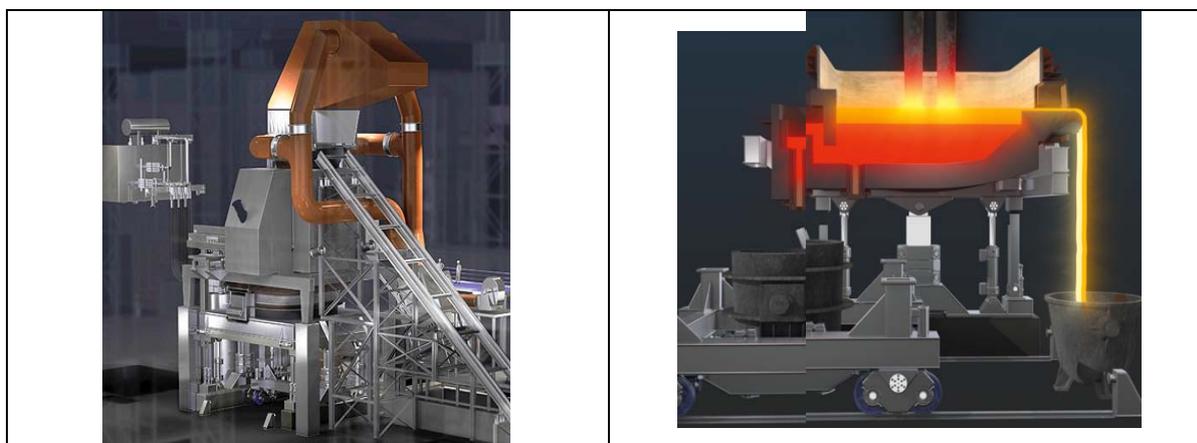


Figura 3. Concepto “Simetal EAF Quantum”, con precalentamiento de chatarra en cuba cargada mediante carro elevador y canalón (izquierda), sistema de sangrado tipo sifón y desescoriado continuo (derecha).

Las principales diferencias con la anterior generación de hornos con cuba son, de acuerdo a quienes lo proponen, las siguientes [14]:

- Mejor estanqueidad, con menor ingreso de aire, debido a que la estructura de la cuba es fija y la carcasa inferior es móvil
- Diseño trapezoidal de la cuba, para una mejor distribución de la chatarra y un precalentado eficiente, particularmente cuando la chatarra es de baja densidad
- Mejor caída de la chatarra en la carcasa, mediante el nuevo diseño del sistema de retención

- Mayor pie líquido, para favorecer la transferencia de calor y la velocidad de fusión
- Fusión libre de *flickers* gracias a la nueva configuración de cuba y electrodos

En Talleres y Aceros, México, ya arrancó un horno de estas características, para una producción de 1,2 Mt/año [14]. Está anunciado otro para ser instalado en la acería de Arvedi, en Cremona, Italia.

Un concepto que ha tenido hasta ahora una lenta penetración en el mercado, pero presenta algunas diferencias importantes con el horno tolva de Fuchs es el desarrollado por la antigua NKK, hoy parte de JFE Steel, bajo la denominación ECOARC, comercializado en la actualidad por JP Steel Plantech [15]. La carga de chatarra se realiza mediante un carro. La tolva de precalentamiento está unida a la parte superior de la carcasa. La chatarra no está retenida mecánicamente en la tolva sino que se apila sobre el baño líquido. El tratamiento de gases se realiza con una cámara de post combustión con una temperatura de más de 900 °C para asegurar la descomposición de las dioxinas, y una cámara de enfriamiento rápido para evitar que las mismas se recompongan. Hay tres hornos en operación en Japón y uno en Corea. No hay datos de performance publicados. Los que lo comercializan afirman que es posible lograr un consumo específico de energía eléctrica de 200 kWh/t para un consumo de oxígeno de 50 Nm³/t.

Los efectos favorables de los sistemas de precalentamiento de chatarra sobre el consumo específico de energía se verifican en la comparación que se presenta en la figura 4, que incluye exclusivamente hornos que cargan 80% o más de chatarra (para evitar los efectos del arrabio y el hierro esponja en relación con el consumo específico de energía). Claramente, los hornos con algún tipo de precalentamiento se ubican en la franja de menor consumo, junto con los mejores hornos estándar.

3.4 Carga única: para bajar inversión y aumentar productividad

A medida que los hornos han aumentado en tamaño, ha crecido el número de cestas necesario para completar la carga. Esto implica una pérdida de productividad, dado que se necesita tiempo para el movimiento de ascenso de los electrodos, el giro de la bóveda, la descarga de la cesta, nuevamente el giro de la bóveda y el descenso de los electrodos. La preparación adecuada de la chatarra ayuda a incrementar su densidad aparente y disminuir el número de cestas necesario.

Recientemente se han diseñado hornos que admiten una carga con una sola cesta, y se han modificado hornos existentes para admitir una carga única, aunque sea realizada con dos cestas. Se presentan cuatro ejemplos de plantas de Estados Unidos: Gerdau Jacksonville [16]; Nucor Steel Jewett [17], SDI Butler [18] y Evraz Pueblo [19]. Cabe mencionar que algunos de los hornos que operan con alto porcentaje de arrabio líquido y algunos hornos tolva también realizan una carga única de chatarra.

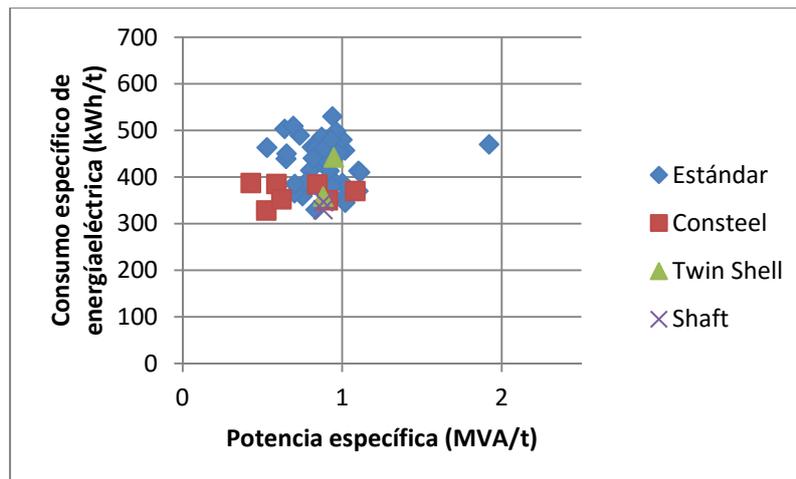


Figura 4. Consumo específico de energia elétrica em função da potência específica do forno, para fornos estándar e com diferentes tipos de preaquecimento de chatarra, que carregam um mínimo de 80% de chatarra.

4. CONTROL AUTOMÁTICO DEL PROCESO

Los avances en este aspecto han cubierto todo el espectro de operaciones del horno, desde la preparación de cestas hasta la operación de sangrado. Se han implementado sistemas digitales de regulación de electrodos, programas de aplicación de energía eléctrica y energía química. Dos aspectos que están en desarrollo son el control en línea de la escoria espumosa y el control dinámico del proceso mediante el análisis de los gases de escape del horno y otros sensores.

4.1 Control en línea de escoria espumosa

Se han desarrollado sistemas de evaluación de la escoria espumosa basados en la medición de variables eléctricas, del ruido y de las vibraciones en la carcasa del horno. Los datos proporcionados por estos sistemas pueden ser utilizados por el operador para la toma de decisiones; pero también se ha buscado utilizar estos sistemas como base para regular en línea la adición de carbono.

Uno de estos sistemas se denomina comercialmente Simetal FSM (*Foaming Slag Manager*). Se basa en la medición de vibraciones en la carcasa del horno, y se desarrolló en la acería de Lech Stahlwerke, Alemania [20]. En la figura 5 se presenta el esquema de la medición indirecta de la altura de la escoria espumosa en tres zonas del horno. La altura de escoria determina la transmisión de sonido a la carcasa del horno. Sobre la base de las señales de altura de escoria, mediante un programa de control basado en lógica difusa se realiza el control de las válvulas de los inyectores de carbono, fijando el objetivo de tener una altura uniforme de escoria en las tres regiones evaluadas (figura 6). Además de Lech Stahlwerke otras plantas han adoptado este sistema.

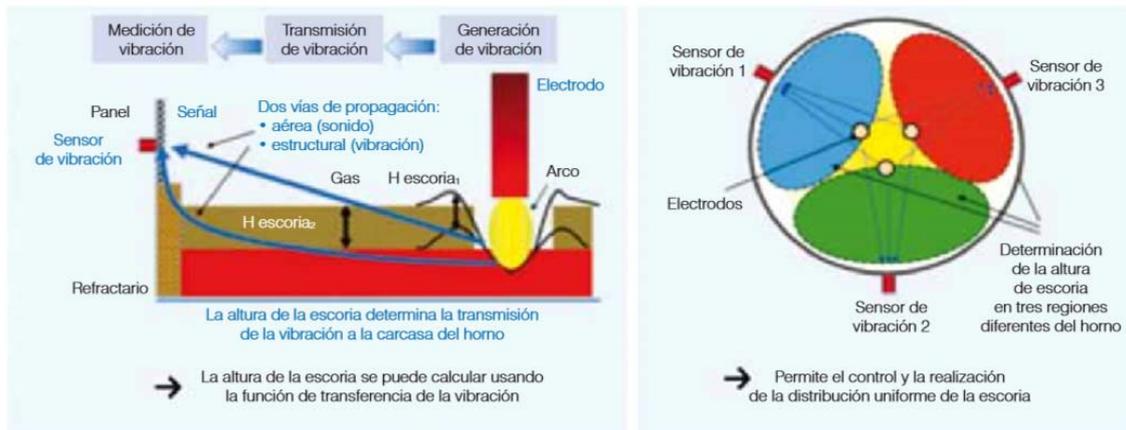


Figura 5. Sistema de medición de la altura de la escoria espumosa basado en la medición de vibraciones en tres puntos de la carcasa del horno. Izquierda: Principio de medición. Derecha: Determinación de la distribución espacial de la altura de la escoria [20].

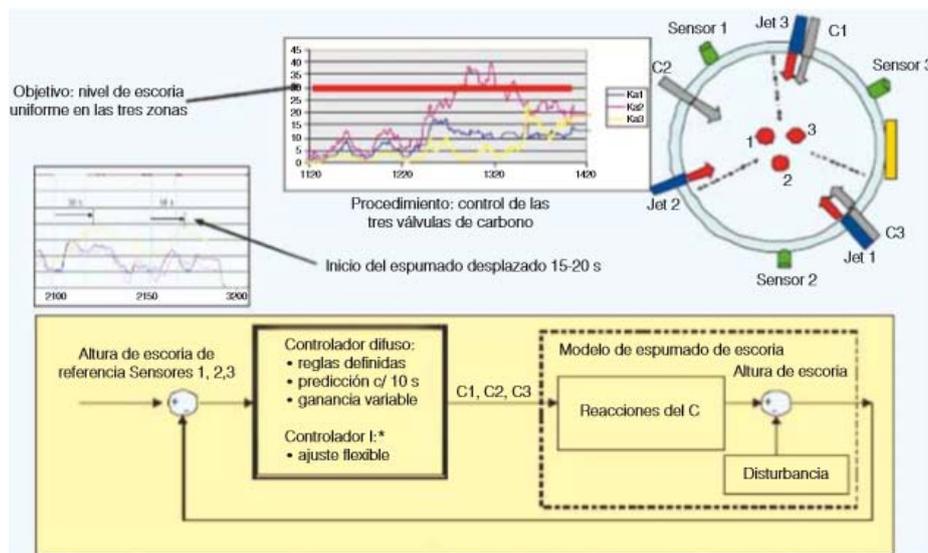


Figura 6. Esquema de control en línea de inyección de carbono basado en la medición indirecta de la altura de escoria en tres zonas del horno [20]. C1, 2,3: Inyectores de carbono; Jet 1, 2,3: Inyectores de oxígeno.

4.2 Control dinámico del proceso

Existen diversos sistemas, tales como el EFSOP de Tenova y el HeatOpt, comercializado por Siemens, que ha sido instalado recientemente en la planta de Roanoke de Steel Dynamics, informando beneficios de USD 2/t [21]. Este sistema Heat-Opt está basado en tres mediciones:

- Análisis de gas, mediante el sistema LOMAS, ampliamente utilizado en convertidores al oxígeno
- Medición de caudal y velocidad de gas de escape SAM
- Evaluación de escoria espumosa mediante medición de armónicas FOX

Sobre la base de estas tres mediciones, y utilizando modelos desarrollados al efecto, se controla en forma automática la inyección de oxígeno para post combustión, los quemadores de oxígeno y gas y la inyección de carbono para el espumado de la escoria.

5. SEGURIDAD EN LA PLATAFORMA

En este rubro ha habido una gran cantidad de innovaciones en los últimos tiempos, con el objetivo de minimizar la necesidad de que el personal de operación del horno deba estar cerca del mismo en diversas situaciones que pueden implicar riesgos de accidente [22]:

- sistemas de enfriamiento más seguros y duraderos;
- robot para posicionamiento y ajuste de electrodos;
- robot para toma de muestras, temperatura y actividad de oxígeno;
- automatización de la operación del agujero de colado;
- puertas de escoria controladas desde el púlpito.

En algunos de estos casos se pueden obtener ventajas adicionales en relación con la disminución de tiempo con horno desconectado, y por ende aumento de productividad, y en algunos casos mejoras en la calidad del acero producido, pero el eje que justifica estas innovaciones es la seguridad del personal de operación y mantenimiento del horno.

REFERÊNCIAS

1. “Energy Technology Perspectives 2012 – Pathways to a clean energy system”. Published by International Energy Agency, 2012.
2. Madias, J.; “Procesamiento de chatarra para acerías”. Acero Latinoamericano, Julio-Agosto 2011, p. 48-56.
3. “Profile of West-Japan Auto Recycle Co. Ltd. (WARC)”. The 12th Northeast Asian Conference on Environmental Cooperation, November, 2003, Toyama, Japan, pp. 187-189.
4. Hornby, S.; Madias, J.; Torre, F.; “Myths and Realities of Charging DRI/HBI in Electric Arc Furnaces”, Iron & Steel Technology, March 2016 (in print)
5. Santos Sampaio, R.; Jones, J.A.T.; Batista Vieira, J.; “Hot metal strategies for the EAF industry”. Iron & Steel Technology, February 2009, pp. 31-37.
6. Xu, X.; Ruan, X.; Zhang, G.; Deng, X.; Grant, M.; Chen, T.; “High efficiency production practice of a 100 t DC EBT EAF at Xing Cheng Steel Works”. AISTech 2012 Proceedings – Volume II pp. 413-422.
7. Tang, J.; Wuxi, X.; Bianchi Ferri, M. Argenta, P.; “Charging hot metal to the EAF using Consteel”. Millennium Steel 2006, pp. 79-86.
8. Kempken, J.; Emling, B.; “X-Melt CONARC technology – Metallurgy with future-oriented flexibility”. AISTech 2010 Proceedings.
9. Hornby, S.; “Hornby, S.; “Mini-mill burdening for maximum efficiency and yield”. Iron & Steel Technology, January 2015, pp. 50-62.
10. “Nuevo sistema de carga de cestas automatiza la alimentación de chatarra en acerías de horno eléctrico”. Gacetilla de Prensa, Siemens Metals Technologies, Linz, Austria, enero 2013.
11. Kotchen, J.K.; “EAF processes and equipment – Some are lost, but not forgotten”. AISTech 2011 Proceedings – Volume I, pp. 887-897.
12. Madias, J. “Recuperación de energía en hornos eléctricos de arco”. Acero Latinoamericano, Julio-Agosto 2010, p. 34-41.
13. Marcozzi, M.; Guzzon, M.; “The evolution of preheating and the importance of the hot heel in supersized EAF systems”. MPT 3/2011, pp. 82-91.
14. Müller, A.; Apfel, J.; Beile, H.; “EAF Quantum – First results from TYASA”. METEC 2nd ESTAD, Düsseldorf, Germany, June 2015.
15. Sato, Y.; “Realization of the coexistence of energy savings and environmental measures in the EAF – Concept of ECOARC”. AISTech 2011 Proceedings – Volume II, pp. 845-856.

16. Patrizio, D.; Cappellari, G.; “One bucket charging Fast Arc in Jacksonville”. 41º Seminário de Aciaria de ABN, Resende, Brasil, maio de 2010, p. 616-626.
17. Laurenti, S.; Gottardi, R.; Minai, S.; Partyka, A.; “High performance single-bucket charging EAF practice”. Ironmaking & Steelmaking 2005 Vol. 32 No. 3, pp. 195-198.
18. Butcher, B.; Krotov, Y.; Laroy, B.; Vanover, K.; Meyer, S.; “Single charge EAF modification: Installation and experience. AISTech 2010 Proceedings – Volume I, pp. 771-781.
19. Ellis, D.; Varick, V.; Abel, M.; Daum, Th.; “EVRAZ Pueblo best practice operation with SIMETAL EAF Ultimate technology — 7 years of records in the making”. AISTech Conference Proceedings, pp. 707-716.
20. Matschullat, T.; Rieger, D.; Krüger, K; Döbbeler, A.; “Foaming slag and scrap melting behavior in electric arc furnace – a new and very precise detection method with automatic carbon control”. 9th European Steelmaking Conference, Krakow, Poland, May 2008.
21. Dorndorf, M.; Abel, M.; Aflenzer, H.; Vaillancourt, D.; Tratnig, M.; “The holistic approach for efficient scrap melting”. 44o Seminario de Aciaria da ABM, Araxá, Brasil, maio de 2013.
22. Gottardi, R.; Partyka, A.; Miani, S.; Novak, H.A.; Klipa, N.; “Enhanced Slag Door for Electric Arc Furnace”. AISTech 2011 Proceedings – Volume I, pp. 857-865.