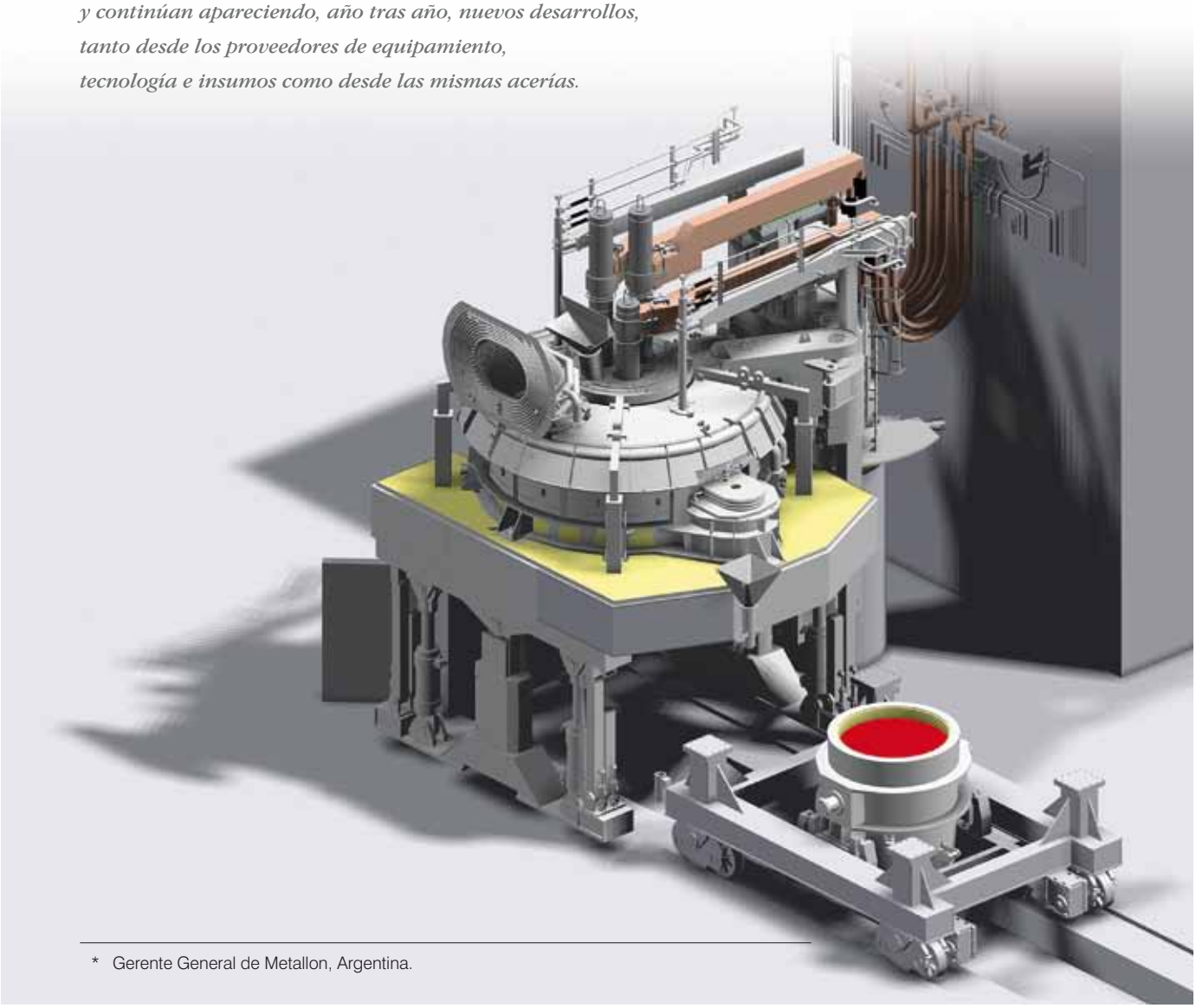
El impacto de las recientes innovaciones en los hornos eléctricos de arco

Por Jorge Madías*

Mientras otros procesos de aceración han desaparecido, los hornos eléctricos de arco pasaron por cambios extraordinarios que han permitido que sean la herramienta elegida para producir casi una tercera parte del acero en el mundo. La dinámica innovadora no se ha detenido y continúan apareciendo, año tras año, nuevos desarrollos, tanto desde los proveedores de equipamiento, tecnología e insumos como desde las mismas acerías.



* Gerente General de Metallon, Argentina.

Introducción

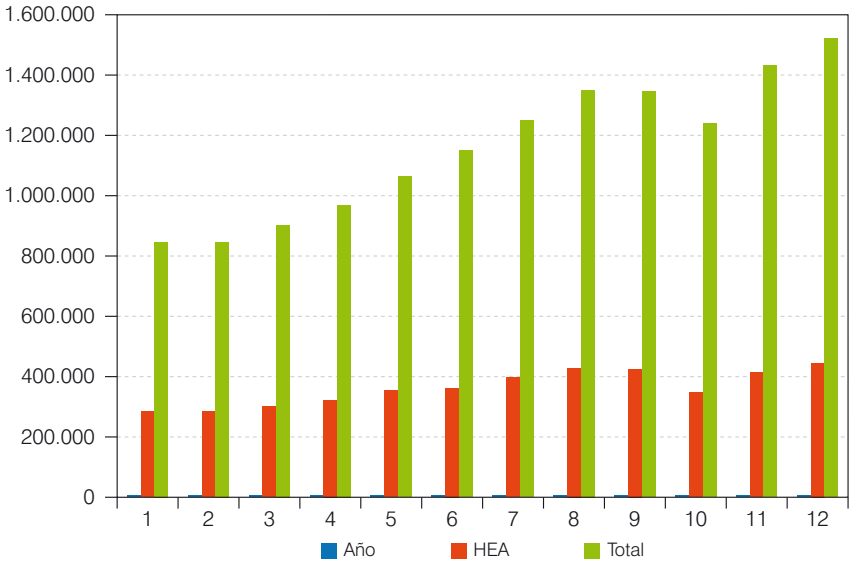
En 2011 se produjeron mediante hornos eléctricos de arco (HEA) unas 445 millones de t de acero, casi el 30% del total. En el año 2000, la producción de acero por esta vía se había acercado al 34% del total, pero el crecimiento posterior de China, mayoritariamente por la ruta alto horno-acería al oxígeno, disminuyó la participación de las acerías eléctricas, aunque no el total producido (Figura 1).

China, Estados Unidos e India son los líderes mundiales en cuanto al volumen producido (Cuadro 1).

En la medida que China y otros países emergentes dispongan de más chatarra y si las emisiones de CO_2 de esos países comienzan a ser restringidas, resulta lógico esperar un incremento de la producción por la vía de las acerías eléctricas. La Agencia Internacional de Energía elaboró 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% [2]. Estas predicciones se basan en tres escenarios de aumento de la temperatura media global: 6°C, 4°C y 2°C. El de 6°C es una extensión de las tendencias actuales; el de 4°C tiene en cuenta los compromisos asumidos hasta ahora por los países en cuanto a limitar las emisiones y mejorar la eficiencia energética y el de 2°C es en un escenario muy restrictivo de las emisiones de CO_2.

En el Cuadro 2 se presentan los escenarios mencionados, respecto a su incidencia sobre la ruta de proceso y la utilización de metálicos, en comparación con la situación del año 2010.

Figura 1
Evolución de la producción de acero vía horno eléctrico y total mundial (período 2000-2011)



Elaborado a partir de datos extraídos de worldsteel [1].

Cuadro 1
Los diez productores más importantes de acero mediante hornos eléctricos de arco en el año 2011. Elaborado a partir de datos extraídos de [1]

China	70.900.000
Estados Unidos	52.107.000
India	43.100.000
Corea del Sur	26.377.000
Turquía	25.275.000
Japón	24.858.000
Italia	18.843.000
Rusia	18.500.000
Alemania	14.204.000
México	13.035.000

Cuadro 2
Escenarios de incremento de temperatura promedio global en condiciones de baja y alta demanda de acero y su influencia sobre la ruta de proceso y consumo de metálicos para el año 2050, según la Agencia Internacional de la Energía [2]

		Año 2010	Año 2050: baja demanda			Año 2050: alta demanda		
			6°C	4°C	2°C	6°C	4°C	2°C
Ruta de proceso	HEA (%)	28,5	50,2	51,6	50,6	50,4	51,7	51,0
	BOF (%)	71,5	49,8	48,4	49,4	49,6	48,3	49,0
Metálicos	Arrabio (%)	68,6	45,6	44,3	40,8	45,5	44,2	37,9
	DRI a gas (%)	3,5	7,0	7,0	9,5	7,0	7,0	9,7
	DRI a carbón (%)	1,3	4,8	4,8	0,0	4,7	4,7	0,0
	Fusión reductora (%)	0,0	0,5	0,5	4,8	0,4	0,4	7,4
	Chatarra (%)	26,6	42,1	43,4	44,8	42,4	43,7	45,0

El incremento es marcado entre el año 2010 y los escenarios del año 2050 (del 28,5% hasta el 50%-52%). La penetración del HEA en el año 2050 varía poco entre los distintos escenarios.

Si bien este pronóstico ha generado controversias [3], refleja las expectativas existentes en el futuro crecimiento de esta ruta de proceso.

Esto plantea un desafío al desarrollo de tecnologías en este campo, para aumentar la eficiencia energética del horno eléctrico, incrementar su productividad, disminuir su costo operativo y mejorar su *performance* ambiental. En este trabajo se procura resumir algunos de los avances realizados en este terreno en tiempos recientes. Se analizan separadamente los progresos en la carga metálica, el diseño del horno (incluyendo la evolución en tamaño), el precalentamiento de chatarra y la carga caliente de hierro esponja, la recuperación de energía, el uso de inyectores, la evolución en el uso de corriente continua, el aumento de la automatización y el uso de robots, y los aspectos ambientales.

Carga metálica: preparación y aporte de energía

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. En el Cuadro 3 se presentan las tendencias regionales en cuanto al tamaño de fragmentadoras y el sistema preferido de limpieza de aire [4].

Para disminuir la presencia de contaminantes y metales no ferrosos en la chatarra, una vez fragmentada, se han implementado diversos sistemas. Por ejemplo, hay dos basados en el análisis químico del material que pasa por una cinta, sea sobre la base de fluorescencia de rayos X de alta velocidad o mediante el análisis rápido por activación de neutrones gamma. El primero analiza cada pieza de chatarra y define basado en criterios preestablecidos si esa pieza debe separarse; en caso afirmativo, al momento de caer de la cinta es eyectada mediante válvulas de aire comprimido de alta potencia. El segundo sistema analiza el conjunto del material que pasa y 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 [4].

En cuanto a la eliminación de contaminantes y metales no ferrosos, los mejores resultados se obtienen con el desmantelamiento previo de los automóviles. Un ejemplo extremo en ese sentido es la planta de WARC (West Japan Auto Recycle Co., Ltd.) (Figura 2). Los automóviles se desmantelan totalmente, eliminando el problema de la disposición del residuo que se genera en las fragmentadoras [5].

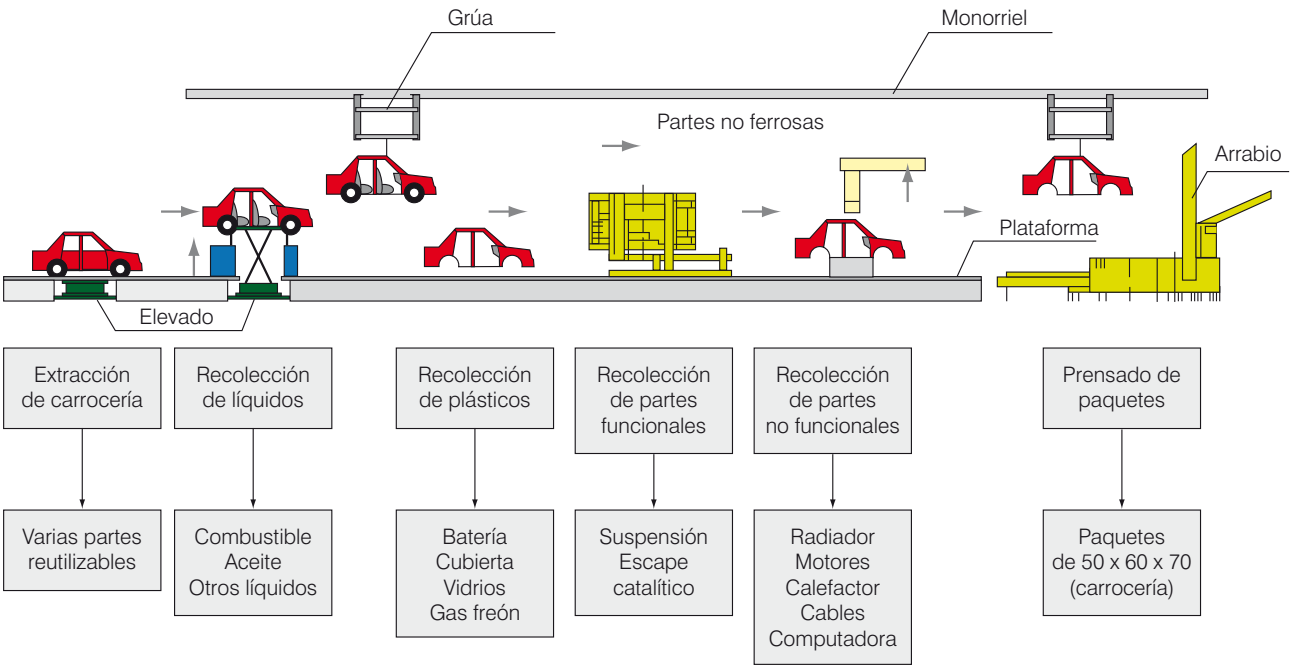
Hierro esponja

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 el año 2012 los 73 Mt. Se estima que cubre el 15% de las necesidades de metálicos en los hornos eléctricos

Cuadro 3
Tendencias geográficas recientes en el tamaño / potencia de las fragmentadoras y en el sistema de limpieza del aire

País / Región	Tamaño / Potencia del motor	Sistema de limpieza del aire
Estados Unidos	Grande / Muy grande	Seco o semihúmedo
Europa	Mediano / Grande	Seco
Japón	Pequeño	Seco

Figura 2
Planta de desmantelamiento de automóviles fuera de servicio de WARC [5]

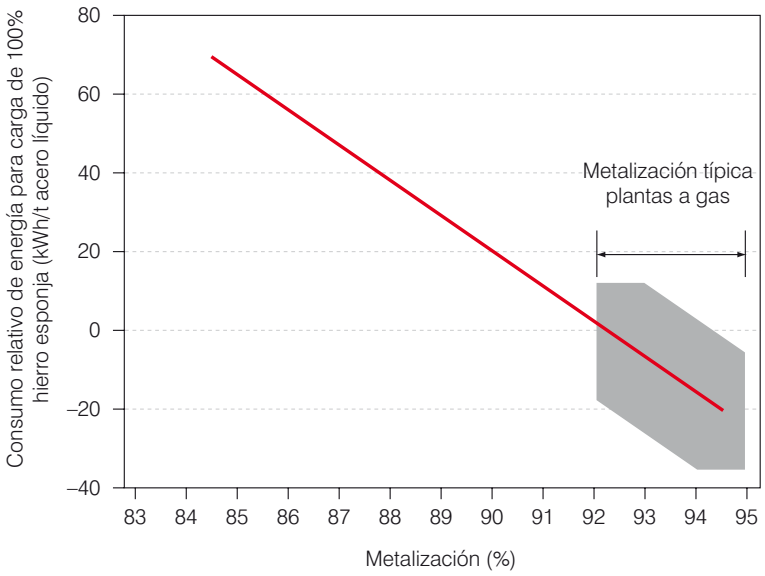


de arco. Una cuarta parte se produce en hornos rotativos a carbón, principalmente en India, y las tres cuartas partes restantes en hornos de cuba con gas natural, principalmente en India, Irán, México, Arabia Saudita y Rusia [6]. Es sabido que la fusión del hierro esponja consume más energía eléctrica que la de la chatarra, debido a la presencia de la ganga en el mineral original, que no se separa durante la reducción porque esta se produce en estado sólido. Un alto porcentaje de metalización (Figura 3) y un tenor de carbono de entre el 2% y el 2,5% ayudan a disminuir esta diferencia con la chatarra.

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

- reformación del gas natural en el horno de cuba, que permite bajar el costo de inversión en una planta de este tipo. En este proceso la reformación del gas se hace en el horno de cuba; no hay horno de reformado. Comercialmente se le conoce como «ZR» (o *zero reforming* por su denominación en inglés);
- introducción de miniplantas de reducción directa, con mayor factibilidad económica debido a la eliminación del reformador;
- uso de diversos tipos de gases además de gas natural (gas de unidades Corex, gas de carbón, eventualmente gas de coquería); y

Figura 3
Influencia de la metalización del hierro esponja sobre el consumo específico de energía eléctrica para una carga del 100% de hierro esponja [7]

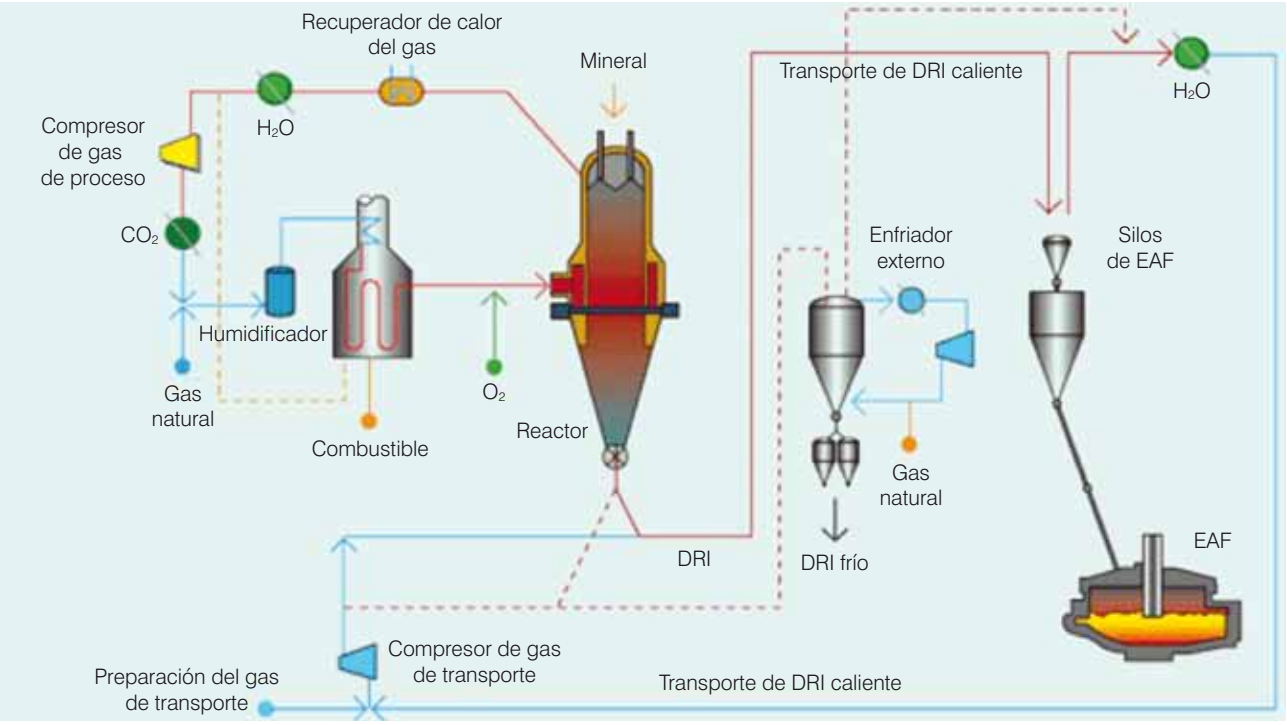


- reconsideración de la alternativa de carga caliente del DRI en el horno eléctrico.

Con respecto a la carga caliente del hierro esponja, hay tres formas de realizarla:

1. mediante recipientes cerrados, como se practicara inicialmente en Cosigua, Brasil y luego en Essar Steel, India;
2. mediante transporte neumático por cañerías inertizadas con nitrógeno, como se practica en Ternium Guerrero y Ternium Puebla, ambas en México (Figura 4); y
3. mediante cintas transportadoras especiales, como se practica en Hadeed, Arabia Saudita.

Figura 4
Esquema de un horno eléctrico de arco alimentado mediante carga caliente de hierro esponja por transporte neumático [8]



La reducción directa a carbón es practicada en gran medida en la India y en menor proporción en otros países. Una desventaja inherente a este proceso es el bajo contenido de carbono, del orden del 0,1% al 0,2%. Otras desventajas frente a la reducción directa a gas tienen que ver con las condiciones en que esta técnica es practicada en la India: carbón sin procesamiento previo, de alto contenido de cenizas; mineral de hierro con alto contenido de ganga, inexistencia en muchos casos de instalaciones adecuadas para la extracción de humos; alta generación de residuos.

Arrabio sólido

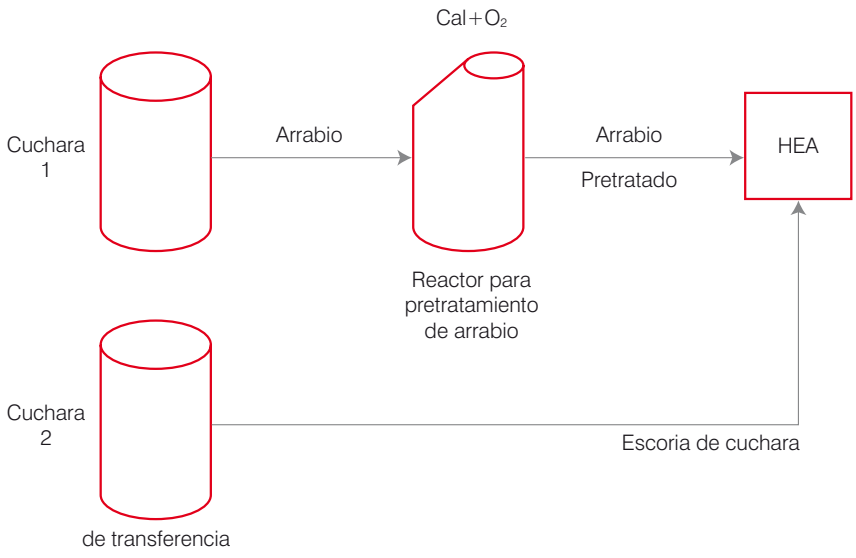
Es habitual que quienes disponen de esta materia prima a un precio competitivo la utilicen en un pequeño porcentaje, del orden del 5%, por las ventajas que presenta en cuanto a mejora de la densidad de carga, aporte de carbono, bajos residuales, etcétera. El uso de este tipo de carga metálica en porcentaje elevado es una práctica usual en Brasil, debido a la disponibilidad de arrabio proveniente de altos hornos 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 1 a 3 kWh/t acero crudo, por cada 1% de arrabio adicionado en la carga.

También consumen arrabio sólido diversas acerías eléctricas de Estados Unidos que elaboran acero para productos planos. En este caso se busca tener un menor contenido de cobre y otros elementos residuales. Es interesante mencionar que debido a la demanda por parte de estas acerías, de arrabio con tenor de fósforo bajo, algunas plantas brasileñas, como Siderúrgica Ibiraçú [9] y Siderúrgica Fergumar [10], han introducido la defosforación externa del arrabio al estilo japonés.

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 y América del Norte. 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 [11]. También hay acerías eléctricas que han incorporado mini altos hornos, o lo reciben de altos hornos independientes cercanos, como sucede en China [12] y Brasil (ver Recuadro). El ahorro de energía eléctrica se estima en unos 3 a 5 kWh/t por cada 1% de arrabio líquido adicionado, siempre que la proporción utilizada sea superior al 20%.

Figura 5
Esquema del proceso de carga de arrabio líquido en el horno eléctrico de TISCO Taiyuan [14]



Los métodos de carga usuales son: 1) mediante el vuelco directo de una cuchara sobre el fondo líquido del horno; 2) el vuelco sobre agujeros perforados mediante los electrodos en la chatarra cargada previamente; 3) 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 [13].

El uso de gran 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, TISCO Taiyuan, una empresa productora de aceros especiales que ya consumía proporciones importantes de arrabio líquido en un horno eléctrico de 50 t, debió desarrollar un nuevo proceso. Al aumentar la producción del alto horno, fue necesario consumir un mayor porcentaje de arrabio líquido sin incrementar el tiempo entre colada y colada. Es sabido que la decarburación adicional implica una demora importante. Para ello modificó una cuchara de transferencia de arrabio (Figura 5) e implementó un sistema de lanza de oxígeno [14].

Se cargan dos cucharas de arrabio. La primera es tratada en el recipiente implementado, donde se adiciona cal y se inyecta oxígeno con una lanza de tres agujeros, a razón de 2.700-2.900 Nm^3/h. En el Cuadro 4 se presenta la evolución en la composición química del arrabio durante el pretratamiento. Se observa que además de la decarburación hay una defosforación importante.

La segunda cuchara de arrabio no es tratada, pero se le hace una adición de escoria de cuchara antes de cargarla al horno. Fue posible incrementar la proporción de arrabio líquido del 40% al 52%-57% reduciendo el tiempo entre colada y colada entre 5 y 10 minutos (de 75 a 67). El consumo de energía eléctrica disminuyó de un promedio de 171 a 132 kWh/t de acero líquido.

Otro ejemplo de solución extrema para poder operar con alto porcentaje de arrabio líquido es 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

Cuadro 4
Composición química y temperatura del arrabio antes y después del pretratamiento [14]

Arrabio	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	T (°C)
De alto horno	> 4,05	< 0,45	< 0,45	< 0,058	< 0,025	1.280-1.350
Luego de pretratamiento	1,5-2,0	< 0,27	< 0,26	< 0,023	< 0,025	1.500-1.600

ACERACIÓN ELÉCTRICA EN AMÉRICA LATINA

América Latina produjo en 2011 un total de 31.515.000 t de acero en hornos eléctricos de arco, equivalente al 47,5% de la producción regional total. Este es un porcentaje que está muy por encima del promedio mundial, lo que subraya la importancia que esta ruta de proceso tiene para la región. Los tres principales productores por esta vía fueron Brasil, México y Venezuela.

La escasez de chatarra con relación a la producción en HEA ha motivado que se haya desarrollado de manera importante el uso de metálicos alternativos. Cuatro países latinoamericanos utilizan una fuerte proporción de hierro esponja (DRI) en la carga de los hornos eléctricos:

1. México (plantas de Ternium en Puebla y Monterrey, y de ArcelorMittal en Lázaro Cárdenas);
2. Venezuela (plantas de SIDOR y del Complejo Siderúrgico Nacional, ex Sidetur, en Casima);
3. Argentina (Acindar, en Villa Constitución y Tenaris Siderca en Campana); y
4. Trinidad y Tobago (ArcelorMittal Point Lisas).

Estas plantas han hecho una experiencia importante en procura de disminuir el consumo específico de energía eléctrica, mediante la obtención de una alta metalización del DRI en las unidades de reducción directa [1] y, en algunos casos, la carga en caliente del DRI, desarrollada en México, que se analiza en el cuerpo central de este artículo. El recordado Ing. Jorge Uyén introdujo la práctica con puerta cerrada para la fusión de HBI y DRI [2]. En algunas plantas con alta carga de DRI/HBI hubo que resolver el problema de contenidos de fósforo crecientes en el mineral o exigencias de bajo contenido de fósforo en parte del *mix* de productos [3-4].

La carga de un alto porcentaje de arrabio sólido es una especialidad de las acerías eléctricas brasileñas. La disponibilidad de arrabio proveniente de altos hornos a carbón vegetal posibilitó el empleo de un alto porcentaje de esta materia prima alternativa. Dependiendo de las circunstancias, ese porcentaje oscila entre el 10% y el 40%.

Por otra parte, está creciendo el consumo de arrabio líquido, que trae aparejado un ahorro de energía eléctrica siempre que la carga sea superior al 20%. Entre las plantas que utilizan esta materia prima se encuentran ArcelorMittal Juiz de Fora [5], ArcelorMittal Cariacica [6], SINOBRAS (Marabá), ArcelorMittal Lázaro Cárdenas [7] y próximamente Vallourec & Sumitomo de Brasil (Jeceaba).

En cuanto a la preparación de chatarra, hay en la región fragmentadoras de gran tamaño como la instalada en Gerdau Aços Longos Unidade Cosigua, Santa Cruz, Brasil, para 3.000 vehículos diarios o 1 Mt/año y diversas unidades medianas y pequeñas, operadas generalmente por las propias empresas siderúrgicas en sus plantas, pero también por subsidiarias o terceros especializados. En los últimos años se han instalado varias fragmentadoras nuevas, como la que opera Harsco en Villa Constitución, Argentina, para la carga de los hornos de Acindar; la de ADELCA en Alóag y la de Novacero en Lasso, ambas en Ecuador, además la de Sidenal en Sogamoso, Colombia. Una de las justificaciones para esta inversión es el aumento de la productividad mediante la disminución del tiempo con horno conectado (*power on time*) y la disminución del consumo específico de energía eléctrica [8].

El precalentado de la chatarra se ha aplicado tempranamente en el *shaft furnace* de la actual Ternium Monterrey. Más recientemente, arrancó el primer horno Consteel de América Latina en VS Tubos, Jeceaba, Brasil [9]. Se ha anunciado la construcción de otros dos hornos Consteel en Ecuador, en las plantas de Andec, Guayaquil y Novacero, Lasso [10] y un horno Quantum, heredero del concepto de *shaft furnace*, en la planta de Veracruz, México, de Talleres y Aceros (ver Artículo principal). En los hornos convencionales se ha analizado en detalle el consumo de energía para la fusión de los diversos tipos de chatarra y las pérdidas de energía que se producen en la operación del horno [11].

Un consultor latinoamericano especializado en el tema hizo interesantes contribuciones al análisis de las variables eléctricas de los hornos [12]. Uno de los primeros hornos de corriente continua con cátodos gemelos fue instalado en la planta de Ternium Monterrey [13]. En esta empresa, al operar hornos de corriente continua y de corriente alterna, se pudo hacer una comparación entre ambos, desde el punto de vista eléctrico [14].

La repotenciación de los hornos existentes fue en la última década una constante [15].

El uso de inyectores de oxígeno, carbono y gas natural está ampliamente extendido en la región [16]. Un desarrollo específicamente latinoamericano es la inyección sumergida de oxígeno. Creada inicialmente para los hornos EOF, que no utilizan energía eléctrica para la fusión, se está probando actualmente en un horno eléctrico de Brasil. Se espera que sea útil para acelerar la decarburación del baño, particularmente en las condiciones correspondientes a una proporción de arrabio líquido en la carga. Se espera una reducción del consumo específico de energía eléctrica de al menos 5 kWh/t y de oxígeno de 5 Nm^3/t [17].

Varios hornos latinoamericanos han adoptado el análisis continuo en línea de los humos como una alternativa para reducir el consumo de energía y, en ciertos casos, prevenir perforaciones de paneles [18-19]. En diversos HEA de la región se utilizan robots para funciones como la colocación de electrodos, la toma de muestras para análisis químico y mediciones de temperatura y actividad de oxígeno. En una cantidad importante se implantaron modernos sistemas de automatización, algunos de ellos desarrollados en la región [20-22].

La mejora continua es una tarea que se lleva a cabo con intensidad, siguiendo las metodologías internacionales. Se han publicado resultados de algunos de los planes de mejora, por ejemplo, los relacionados con la disminución del consumo de energía eléctrica [23], electrodos [24] y refractarios [25]. La mejora del rendimiento metálico es un ítem al que se le presta atención [26-27]. También aspectos del mantenimiento de los hornos son motivo de planes de mejora continua [28-29]. Este esfuerzo por la mejora continua también se observa en las plantas más pequeñas [30-32].

En el reciclado de refractarios y escorias en los hornos eléctricos se verificaron logros concretos [33-34]. En cuanto al reciclado de los polvos recuperados en la casa de humos, a las experiencias mexicanas de uso del cubilote Oxycup de ArcelorMittal Lázaro Cárdenas, y del envío a reciclar en el horno Waelz de Zinc Nacional por parte de Ternium Apodaca y otras plantas del norte de México, se ha sumado el arranque del horno Waelz en la Planta de Polimetálicos de Votorantim en Juiz de Fora, Brasil, donde están siendo reciclados polvos de acerías eléctricas brasileñas [35].

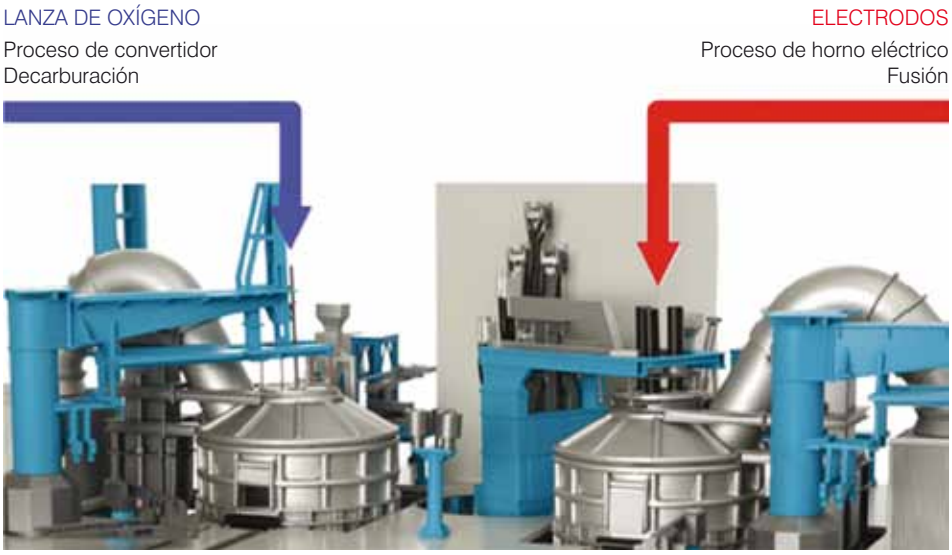
una instalación para aplicación de arco eléctrico, que posee brazos portaelectrodos que giran y pueden alcanzar a las dos carcasas (Figura 6).

La operación para una planta que carga hierro esponja y arrabio líquido en proporciones similares, como es el caso de ArcelorMittal Saldanha, considera los siguientes pasos [15]:

- carga de arrabio líquido en carcasa 1;
- soplo con lanza de oxígeno; decarburación del arrabio;
- levantamiento de la lanza; bajada de los electrodos;
- carga continua de DRI y fusión por arco eléctrico;
- simultáneamente, decarburación en la carcasa 2; y
- vaciado de la carcasa 1 y descenso de los electrodos a la carcasa 2.

En el Cuadro 5 se presentan algunos de los hornos eléctricos que operan con arrabio líquido, incluyendo los que utilizan la tecnología CONARC.

Figura 6
Instalación CONARC. Dos carcasas, instalación de lanza de oxígeno y de electrodos [15]



Cuadro 5
Algunas plantas que utilizan arrabio líquido en los hornos eléctricos de arco

Planta	País	Horno/ t colada	Capac. anual (Mt)	Año de arranque	Alimentado por
ArcelorMittal Juiz de Fora	Brasil	Conv. 2 x	1,35	S/D	Mini altos hornos (C.V.)
ArcelorMittal Cariacica	Brasil	Conv.	3,0	S/D	Mini alto horno ind. (C.V.)
SINOBRAS	Brasil	Conv.	2,5	S/D	Mini altos hornos (C.V.)
V&S do Brasil	Brasil	Consteel 150		2013/2014	Mini altos hornos (C.V.)
TISCO Taiyuan	China	Conv. 50 c/pretr.		S/D	Alto horno
Shaoguan Iron & Steel	China	Consteel		2000	S/D
Wuxi Tristar	China	Consteel	0,5	2001	S/D
Shiheng Special Steel	China	S/D	S/D	S/D	S/D
Jianxing Xingcheng	China	DC 100	1,1	1997	Mini alto horno
Xining Special Steel	China	S/D	S/D	S/D	S/D
Ji Nan Iron & Steel	China	S/D	S/D	S/D	S/D
E'cheng Iron & Steel	China	S/D	S/D	S/D	S/D
Tonghua Iron & Steel	China	S/D	S/D	S/D	S/D
JSW Ispat Steel Ltd.	India	CONARC x 2	3,0	1999	Alto horno
Bhushan Steel Ltd.	India	CONARC 2 x 180	2,5	2009	Alto horno
Essar Steel Hazira	India	CONARC 2 x 200	5,0	2010	Corex
SONASID	Marruecos	S/D	S/D	S/D	S/D
ArcelorMittal Saldanha	Sudáfrica	CONARC x 2	1,35	1998	Corex

Conv.: horno convencional; Pretr: pretratamiento de arrabio; C.V.: carbón vegetal; Indep.: independiente; DC: corriente continua.
Elaboración propia, a partir de diversas fuentes.

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 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 (no necesita pasar de un sistema a otro). El control puede efectuarlo el jefe de turno, desde la sala de control [16].

El sistema de carga instalado incluye una solución basada en láser y desarrollada especialmente para la tarea de localizar exactamente la cesta de chatarra, así como sensores inalámbricos para determinar la posición de la grúa en dirección X e Y. La posición en la dirección Z del gancho de la grúa se determina con sensores de alta precisión. Estos datos se transmiten por la red industrial a un robot ya programado. En él se comparan con los recorridos ideales

de desplazamiento consignados en el controlador y se activan los movimientos de grúa necesarios. El sistema de manejo y visualización para las nuevas cargas se ha integrado en la interfaz existente del puesto de control del horno [16].

Frente al manejo manual, este sistema ofrece una serie de ventajas. Las cestas de chatarra se localizan de forma exacta, independientemente de su tamaño, forma o posición en el carro porta cestas, y se pueden tomar con la grúa con precisión. El movimiento de la grúa hacia el *«dog house»* (galpón cerrado donde está instalado el HEA), el acoplamiento de la grúa auxiliar, así como la carga de chatarra en el horno se ejecutan de forma reproducible y automática siguiendo un trayecto óptimo. Esto ahorra tiempo, evita daños de los equipos y reduce los peligros para el personal. Además, los movimientos de la grúa y del *«dog house»* se sincronizan de forma óptima, de modo que el tiempo con horno desconectado se reduce a menos de 1,5 minutos por proceso de carga [16].

Precalentamiento de la chatarra: nuevos horizontes

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 despiertan interés los hornos con precalentamiento de chatarra. Actualmente hay cerca de 60 hornos en operación (35 Consteel, 19 *shaft furnaces* y 4 Eco-Arc). El proceso Consteel 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 aparecieron 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 de calor. 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, afectada por necesidades de mantenimiento [17]. Datos de una fuente independiente indican que la recuperación de energía está entre 30 y 50 KWh/t. En Acero Latinoamericano, edición julio-agosto 2010, se presentó un análisis más detallado de las dos tecnologías predominantes [18].

En la actualidad se están difundiendo conceptos de hornos con precalentamiento que superarían la *performance* de los actuales, en materia de recuperación de energía y bajo consumo específico. 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 poscombustión 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 puesta aguas arriba de la succión de gas (Figura 7).

En la segunda sección se completa la combustión del gas de salida 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 poscombustión y la separación del polvo, cuya parte más gruesa sería atrapada por la carga y se reciclaría al horno [19]. 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.

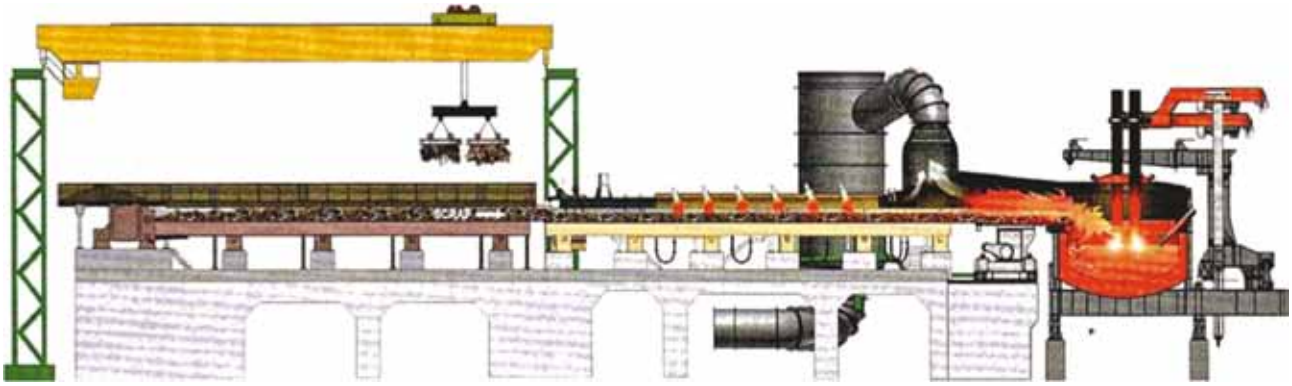
El otro concepto se conoce bajo la denominación de *«Simetal EAF Quantum»*. Es una extensión de la idea básica del *«shaft furnace»*, en la que se opta por la carga de la cuba mediante un carro elevador y un canalón (Figura 8), eliminando cestas y grúa. Para eliminar el tiempo con horno desconectado se utiliza un sistema de sifón para el sangrado.

Las principales diferencias con la anterior generación de hornos con cuba son, de acuerdo a quienes lo proponen, las siguientes [20]:

- 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; y
- fusión libre de *flickers*[1] gracias a la nueva configuración de cuba y electrodos.

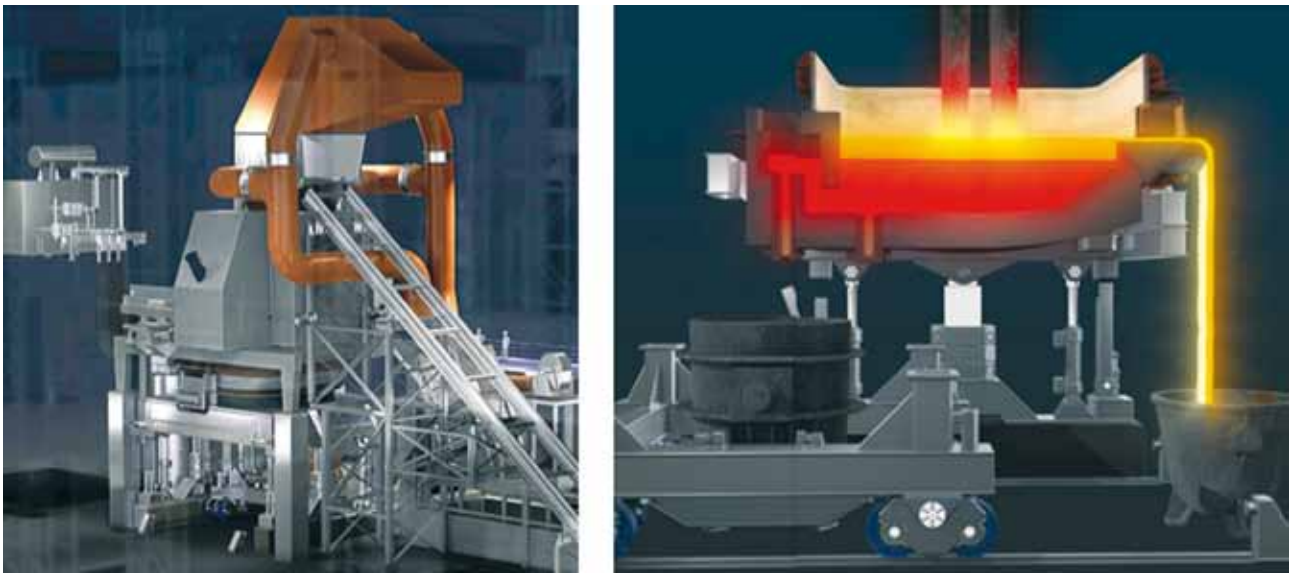
[1] Se puede traducir como «chisporroteo». Se trata de un problema que se genera en la red que alimenta al horno y que repercute sobre otras instalaciones industriales o domiciliarias conectadas a esa red. Se lo denomina así por la forma en que las alteraciones se manifiestan en las lamparitas.

Figura 7
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 [19].

Figura 8
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).

Se ha publicado que Talleres y Aceros, en México, ordenó un horno de estas características, para una producción de 1,2 Mt/año [21].

Carga única: para bajar la inversión y aumentar la 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. Cada caso es una decisión particular. En el Cuadro 6 se presentan tres ejemplos de plantas de Estados Unidos: Nucor Steel Jewett [22], Gerdau Jacksonville [23] y SDI Butler [24].

En los casos de las plantas nuevas, el objetivo buscado al diseñar un horno con una carga única es disminuir la inversión necesaria para lograr una producción determinada. Se puede obtener la misma producción con un horno de menos toneladas por colada que si se planteara una carga con múltiples cestas. Con cesta única el tamaño de horno es más grande pero las toneladas por colada son menos porque la productividad en t/h es mayor.

Aunque el horno va a tener dimensiones muy grandes, el costo de fundaciones, estructura metálica, equipos auxiliares y equipamiento aguas abajo en toda la acería va a ser menor. Las cucharas, las grúas, el horno de cuchara van a ser de menor tamaño, así como la torreta de la máquina de colada continua, el *tundish* y el carro porta *tundish*, entre otros elementos.

A título de ejemplo, se presenta en el Cuadro 7 una comparación de las dimensiones de la carcasa, distancia de banco a carcasa, altura de paneles, pie líquido y volumen de cesta entre un horno convencional de 80 t, uno de 140 t y el horno de 82 t de Nucor Jewett.

La carga única tiene sus ventajas y desventajas, desde el punto de vista del diseño y la operación. En el Cuadro 8 se resumen las explicitadas por SMS Concast analizando el caso de Nucor Jewett.

En plantas existentes, el paso a una carga única está directamente relacionado con la necesidad de aumentar la producción. Es el caso de SMI Butler, con horno de carcasas gemelas (*twin shell*), donde se requería pasar de 2,7 a 3 Mt/año. En la Figura 9 se presenta el diseño anterior y posterior de las carcasas. En este caso la cesta no fue modificada: la carga inicial se realiza con dos cestas.

Cuadro 6
Algunos hornos con carga única

Planta	Constructor/ modificador	Año de arranque/ modificación	t/colada	t/hora	tiempo conectado (min)
Nucor Jewett	SMS Concast	2004	82	140	32
Gerdau Jacksonville*	Danieli	2009	86	115	35
SDI Butler	Superior Machine	2009	235		35

* Este horno sangra a 1.700°C porque no hay horno cuchara.
Elaborado en base a datos tomados de [22-24].

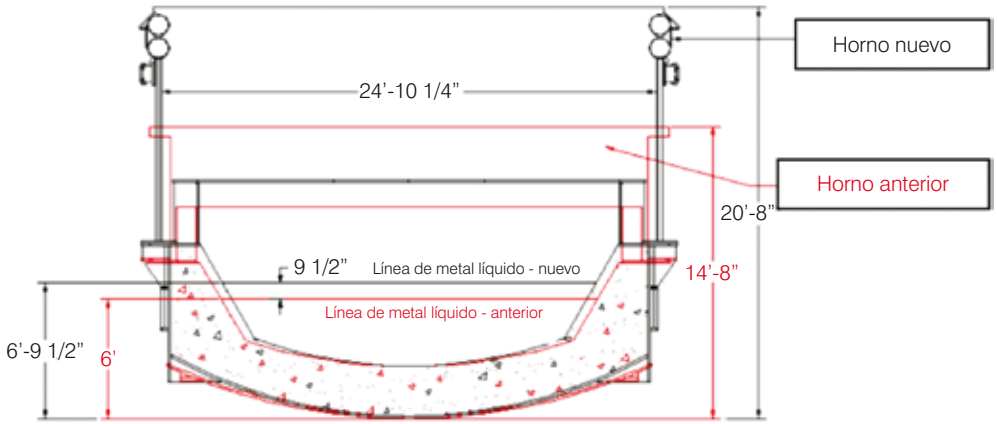
Cuadro 7
Comparación dimensional entre un horno convencional de 80 t, un horno convencional de 140 t y el horno de carga única de 82 t de Nucor Jewett [22]

	Convencional 80 t	Convencional 140 t	Cesta única 82 t
Diámetro de carcasa (m)	5.700	6.700	6.700
Volumen de carcasa (m^3)	80	130	150
Distancia de banco a borde carcasa (mm)	2.700	3.200	3.500
Altura de paneles (mm)	2.300	2.800	3.100
Pie líquido (t)	8-10	12-15	25-35
Volumen de cesta (m^3)	72	117	140

Cuadro 8
Ventajas y desventajas del horno con carga única [22]

Ventajas	Desventajas
• El 30% más de productividad • Menores pérdidas por radiación • Arco más largo, baño plano durante casi todo el tiempo que el horno está conectado • Mayor flexibilidad para posicionamiento de inyectores en el perímetro del horno • Mayor vida de delta refractario y bóveda por mayor distancia al baño y menor salpicado • Mejor rendimiento de quemadores y poscombustión • Mejor estabilidad térmica por mayor masa de refractarios • Decarburación más rápida por mayor superficie líquida	• Mayor requerimiento de agua y mayores pérdidas térmicas por paneles • Necesidad de un diseño mecánico con soluciones especiales y rasgos únicos, especial para soportar la carga • Hidráulica de horno más potente • Vibraciones más fuertes durante la etapa de perforación de la carga, por mayor altura de columna de electrodos • Mayor longitud de electrodo caliente implica mayor superficie expuesta a la oxidación

Figura 9
Diseño anterior (líneas rojas) y diseño modificado para admitir una carga única (líneas negras) en el horno de carcasas gemelas de SMI Butler [24]



En esta planta al modificarse la primera carcasa se verificó un aumento en la rotura de electrodos (una por día), debido a la mayor altura de la columna. Para mejorar esta situación se hicieron cambios en la programación de quemadores, la aplicación de potencia y la configuración de la carga de chatarra. Hubo que aumentar el diámetro del círculo de electrodos y cambiar el diseño de la unión entre electrodos para reforzarla [24].

Una vez puestas en marcha las modificaciones en las dos carcasas, se logró el aumento de capacidad necesario. El consumo de energía se redujo en 30 kWh/t, y el tiempo con horno conectado disminuyó de 40 a 35 minutos. Se disminuyó la pérdida de acero que pasa al pote de escoria del 1,75% al 1,15%; aumentó vida de los deltas de bóveda de 445 a 945 coladas. El consumo de electrodos bajó a 1,27 kg/t (incluyendo roturas) [24].

Cabe mencionar que algunos hornos no convencionales, como los denominados *shaft furnace*, cuando operan con el 100% de chatarra también son de carga única.

Inyectores: ahora la cal

En este campo los avances han sido muy importantes. La introducción de inyectores de oxígeno, carbono y gas natural a través de las paredes del horno permiten eliminar la introducción de lanzas por la puerta de trabajo. Se hacen posibles las prácticas a puerta cerrada, con menor ingreso de aire y menos pérdidas por radiación. El alto grado de automatización alcanzado permite minimizar la necesidad de personal en la plataforma. Se puede aportar la energía química necesaria para acelerar la fusión aumentando la productividad; obtener una escoria espumosa más estable y lograr cierto grado de recuperación de energía mediante poscombustión de los gases en la atmósfera del horno.

Recientemente se han incorporado inyectores de cal (Figura 10, izquierda). Con esto se procura disminuir el consumo global de cal, tener menos pérdida de finos de cal hacia el sistema de evacuación de humos, disponer de flexibilidad en el control de la escoria durante el proceso, disminuir la presencia de finos y polvos dentro de la nave de la acería y sus consecuencias en cuanto a salud ocupacional [25-27].

Para su implementación se requirieron mejoras en el diseño del *dispenser*, rediseño de los inyectores para que tengan proximidad a la escoria (Figura 10, derecha) y la definición de una franja granulométrica de cal adecuada para tener consistencia en la inyección y una disolución más rápida.

Entre las mejoras en el diseño del sistema de inyección cabe mencionar el control de independiente de cada inyector, la posibilidad de usar orificios de diferentes diámetros y la utilización de filtros de humedad en el circuito de aire comprimido.

Se suele inyectar cal cálcica, cal dolomítica o mezclas de ambas [26]. La inyección se realiza habitualmente tan pronto como se dispone de escoria espumosa, aunque algunos operadores prefieren hacer la inyección durante el sangrado o luego del sangrado, para tener MgO disuelto en la escoria antes de la carga de chatarra, para mejorar la protección de los refractarios [25].

Aunque no son prácticas utilizadas masivamente, también se ha realizado mediante inyectores el reciclado de polvos de horno eléctrico, refractarios, escoria de cuchara y finos de hierro esponja.

Se está desarrollando en la actualidad la inyección sumergida de oxígeno (ver Recuadro).

Automatización, control de proceso y robots

Los avances en este aspecto han cubierto todo el espectro de operaciones del horno, desde la ya mencionada automatización de 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, robotización de operaciones como toma de muestras, medición de temperaturas y de oxígeno disuelto en el acero, reparación de refractarios, preparación de la piquera, armado de electrodos sobre el horno, etcétera.

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.

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 usados por el operador para la toma de decisiones; pero también se ha buscado utilizarlos 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

Figura 10
Izquierda: ubicación de los inyectores de cal y oxígeno. Derecha: posicionamiento del inyector de cal para incorporación rápida a la escoria [25]

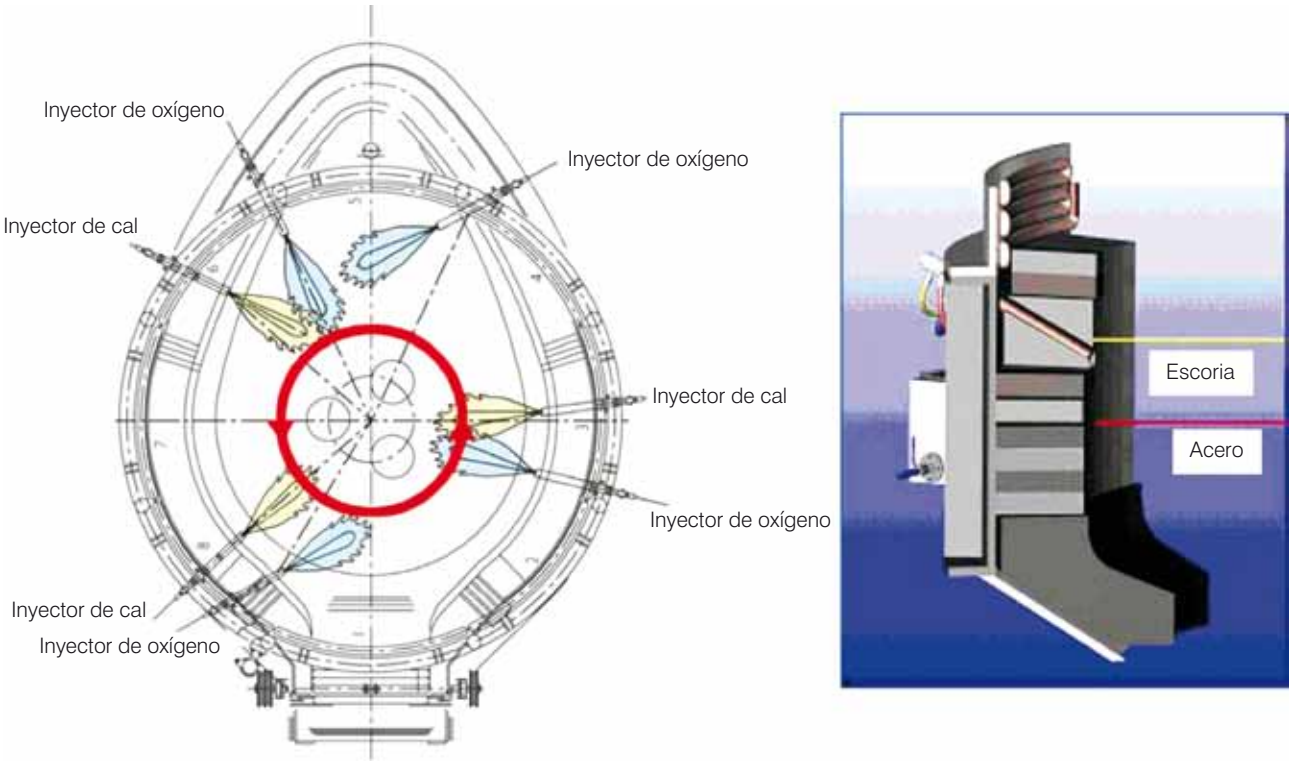
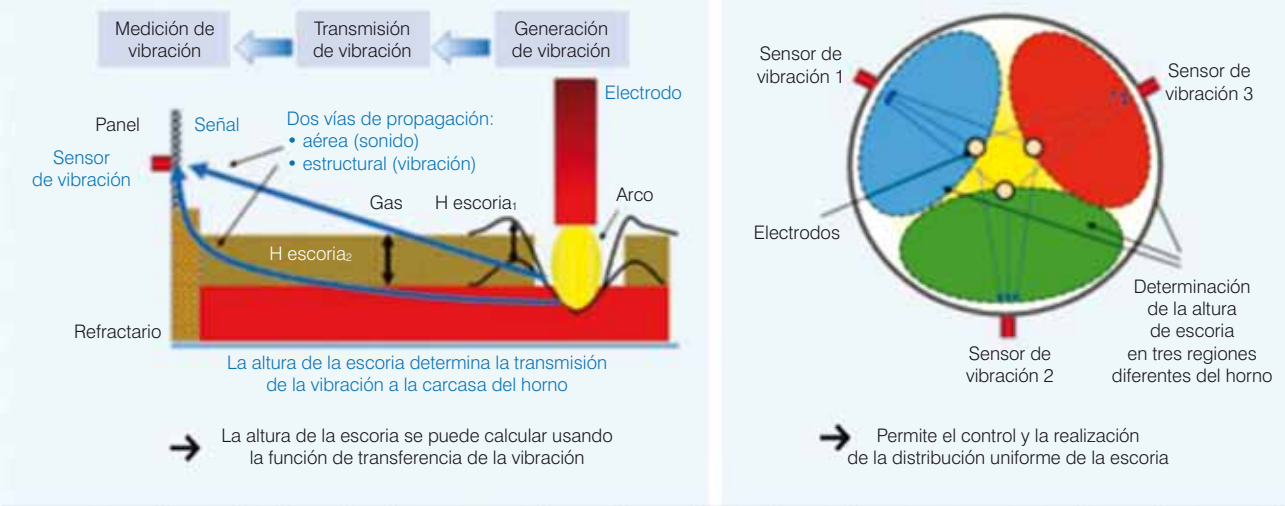
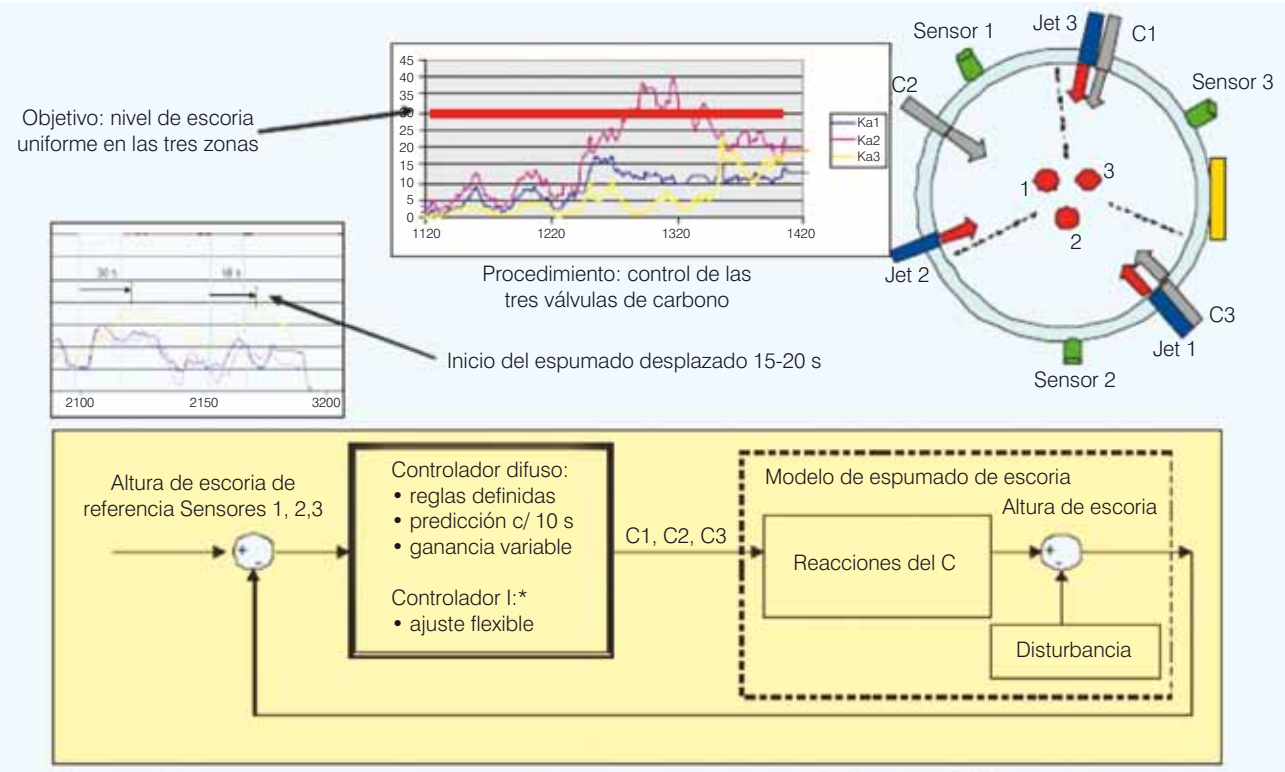


Figura 11
Sistema de medición de la altura de la escoria espumosa basado en la medición de vibraciones en tres puntos de la carcasa del horno



Izquierda: Principio de medición. Derecha: Determinación de la distribución espacial de la altura de la escoria [29].

Figura 12
Esquema de control en línea de inyección de carbono basado en la medición indirecta de la altura de escoria en tres zonas del horno [28]. C1, 2,3: Inyectores de carbono; Jet 1, 2,3: Inyectores de oxígeno



* Controlador I (*Input controller*): controla las variables de entrada, a diferencia de los I/O *controller*, que controlan tanto la entrada como la salida.

vibraciones en la carcasa del horno y se desarrolló en la acería de Lech Stahlwerke, Alemania [28]. En la Figura 11 se presenta el esquema de la medición indirecta de la altura de la escoria espumosa en tres zonas del horno, determinadas por la posición de los electrodos. 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 como objetivo tener una altura uniforme de escoria en las tres regiones evaluadas. La elección tiene que ver con la posición de los electrodos (Figura 12). Además de Lech Stahlwerke otras plantas han adoptado este sistema.

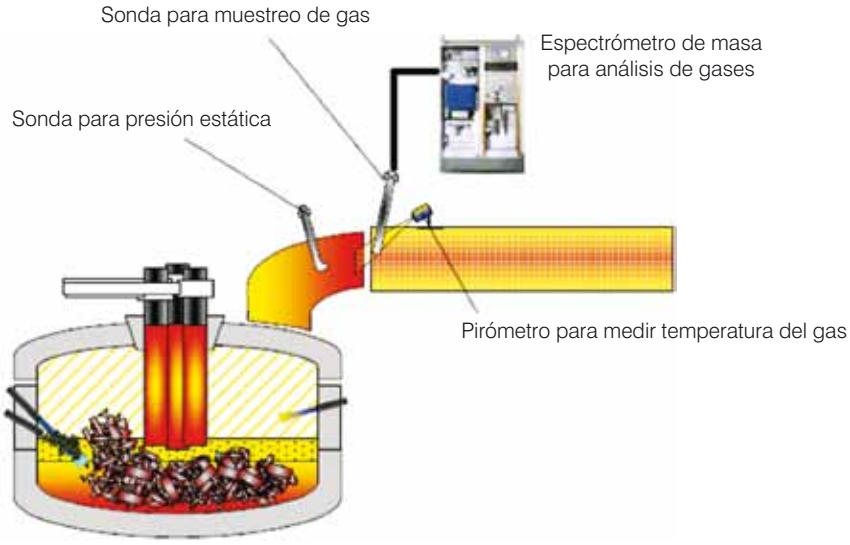
Control dinámico del proceso mediante el análisis de los gases de salida

Existen diversas tecnologías para el análisis en línea de los gases de salida del horno. Una importante cantidad de hornos tienen instalado alguno de estos sistemas, que proporcionan información al operador y al ingeniero de procesos para interpretar diferentes situaciones operativas. Los datos obtenidos pueden permitir, por ejemplo, bajar el consumo de gas natural o incrementar el oxígeno para mejorar el balance energético en los períodos en que hay alto porcentaje de CO y H_2, ya que se pierde energía en el gas de escape. En algunos casos se pueden detectar perforaciones de paneles. En la Figura 13 se presenta un esquema de uno de estos sistemas.

Se pretende también utilizar la información obtenida con ese análisis y proveniente de otros sensores para poder predecir temperatura y carbono finales de manera equivalente al control dinámico que se realiza en los convertidores al oxígeno y para otros propósitos de control de procesos [30]. En la Figura 14 se presenta un esquema de esta propuesta, denominada comercialmente iEAF.

Se calcula la energía neta suministrada al horno y se determina una variable a la que se denomina «progreso de la fusión», en porcentaje. Este valor, en combinación con modelos que corren en tiempo real, provee la base para la predicción de la temperatura. Además, se puede obtener un cálculo en tiempo real del caudal de carbono y oxígeno. Estos valores, en combinación con información de proceso existente en la planta, dan la base para la predicción del tenor de carbono, utilizando una simple regresión lineal múltiple.

Figura 13
Esquema de un sistema de determinación del análisis químico, presión y temperatura de humos de horno eléctrico



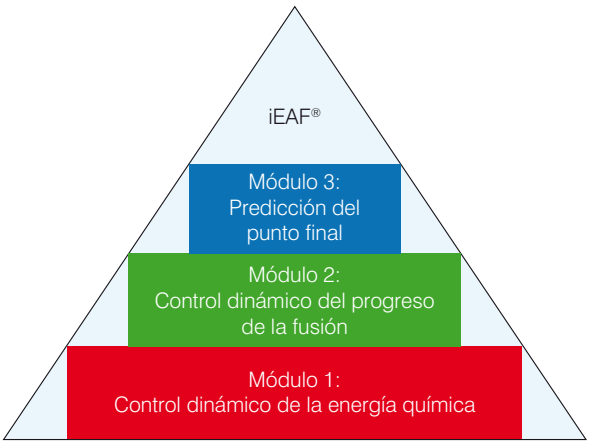
El modelo de predicción de carbono mostró, según sus desarrolladores, resultados precisos en diversas plantas, particularmente para los tenores de carbono bajos. Sin embargo, se está trabajando con estos algoritmos para mejorar la estadística de predicción. Como con cualquier modelo estadístico basado en información previa del proceso, el modelo necesita ser actualizado frecuentemente para capturar cambios. Específicamente, el tenor de carbono incorporado en la chatarra es susceptible a variabilidad.

El modelo de predicción de temperatura también muestra resultados precisos. Hay una relación clara entre la variable «progreso de la fusión» y la temperatura del baño medida y prevista. Para mejorar la estadística de la predicción se está trabajando en la mejora de los sensores de temperatura y caudal del gas de salida.

Recuperación de energía: las primeras experiencias

A medida que con los avances tecnológicos el consumo específico de energía se acerca a su mínimo, comienza a desarrollarse el interés en la recuperación de energía de los gases para la producción de agua caliente o vapor y eventualmente energía eléctrica. Esta es una tecnología establecida en los convertidores al oxígeno, pero en la acería eléctrica, que tiene poco consumo de vapor o directamente no lo tiene, no ha encontrado

Figura 14
Esquema de la tecnología iEAF para la optimización y el control dinámico del proceso en el horno eléctrico de arco, mediante sensores, modelos y algoritmos de control en tiempo real [30]



Módulo 3: Predicción y control del punto final
- Predicción del punto final (carbono y temperatura)
- Optimización dinámica del afino

Módulo 2: Control dinámico basado en el progreso de la fusión
- Balance de energía y de masa en tiempo real
- Cálculo de energía neto en tiempo real
- Control del horno basado en el progreso de la fusión (químico y eléctrico, sistema de humos)

Módulo 1: Control dinámico y optimización de la energía química
- Análisis continuo de los gases de escape
- Optimización de la energía química y la post combustión
- Circuito cerrado de control en tiempo real (quemadores, inyectores, sistema de humos

Figura 15
Disposición de los hornos eléctricos y equipamiento para la recuperación de calor de los gases de escape en Hyundai Steel Incheon, Corea (izquierda) e información sobre los mismos (derecha) [33]

Horno	4: 70 t, 80 t, 90 t, 120 t
Acumulador de vapor	2 de Ø 3,6 m x 12 m
Tambor de vapor	4 de Ø 2,1 m x 12 m
Intercambiador de vapor	1 de Ø 4,9 m x 4,9

	Anterior	Actual
Emisiones (t CO_2)	1.587.635	1.517.753 (↓ 5%)
Emisiones específicas (t CO_2/t)	0,451	0,428 (↓ 5%)

Acero crudo producido en 2009: 3.542.428 t

Cuadro 9
Instalaciones de recuperación de vapor en hornos eléctricos de arco existentes y anunciadas

Planta	País	Producción	Eficiencia recuperación	Vapor	Año
Georgsmarienhütte	Alemania	140 t/h	42%	21 t/h (216°C - 13-20,5 bares)	2007
Elbe Stahlwerke Feralpi	Alemania	133 t/h	84%	40,8 t/h (250°C-228°C - 27-35 bares)	2013
Hyundai Steel Incheon	Corea	S/D	S/D	S/D	S/D
TISCO Taiyuan	China	S/D	S/D	60 t/h	2014

Elaboración propia sobre datos extraídos de [31-34].

mayor aplicación. Sin embargo, en Europa el comercio en créditos de carbono y el alto costo de la energía eléctrica pueden justificar la inversión.

En una revisión previa, en la misma edición ya citada de Acero Latinoamericano, se analizaron en detalle las diversas alternativas que se están proponiendo [18]. El sistema de enfriamiento evaporativo es el que generalmente se propone para retirar el calor de los gases en el ducto de salida. La siderurgia lo ha empleado ampliamente para los convertidores al oxígeno y los hornos de precalentamiento de planchones de viga galopante. También se proponen calderas de calor residual y acumuladores tipo Ruth. Para la generación de electricidad, se propone sobrecalentar el vapor mediante quemadores de gas natural para emplearlo en turbinas o usar el ciclo orgánico de Rankine.

Se han desarrollado experiencias previas de recuperación de calor en horno de arco en una fundición de John Deere en Estados Unidos y en la planta de Georgsmarienhütte en Alemania. En esta planta había un sistema de enfriamiento evaporativo en la extracción de humos de un convertidor. Al ser sustituido el convertidor por un horno eléctrico de arco, se le incorporó el sistema. En 2007 fue reemplazado por otro más moderno, para utilizar el vapor en la operación de un desgasificador y otros usos menores, reemplazando el vapor producido en una caldera alimentada con gas natural [31].

En 2012 se ha anunciado la implantación de un sistema de recuperación de energía en una acería alemana, Elbe Stahlwerke Feralpi. La operación debería iniciarse en 2013. La energía recuperada se transformará en vapor, que se venderá a una empresa de energía local y a una turbina de ciclo orgánico de Rankine para la generación de energía eléctrica de 2,5 MW [32].

Hyundai Steel en su planta de Incheon, Corea, incorporó la recuperación de energía en cuatro hornos eléctricos, para la producción de vapor para la venta (Figura 15) [33].

A principios de este año se publicó la instalación de un horno del tipo CONARC (de cubas gemelas) con recuperación de calor en China. En este caso el gas se dirige a dos calderas de calor residual que permiten enfriar el gas y usan una gran proporción de la energía térmica recuperada para la generación de vapor que se utilizará en un desgasificador. Se podrán generar hasta 60 t de vapor [34].

En el Cuadro 9 se resumen datos de las cuatro instalaciones mencionadas.

Conclusiones

La evolución tecnológica de los hornos eléctricos de arco logró que este equipo sobreviva por más de un siglo, mientras otros procesos han desaparecido. Mostró un dinamismo extraordinario, que en un período de pocas décadas permitió una disminución espectacular de los consumos específicos de energía, de refractarios y de electrodos, así como un importante acortamiento de los tiempos de colada a colada, con una gran versatilidad en las materias primas que se pueden utilizar para elaborar todos los productos que es posible ubicar en el mercado.

Se está abriendo una nueva etapa plena de expectativas y desafíos, en el marco previsto para las próximas décadas, con una disponibilidad creciente de chatarra y exigencias ambientales en aumento que pueden privilegiar esta ruta de producción de acero.

Agradecimientos

Se agradece al Ing. Francisco Torre (FACTS Ingeniería, Rosario, Argentina) la colaboración prestada en la preparación de este artículo.

Referencias

1. Worldsteel Association Economics Committee, «Steel Statistical Yearbook 2012», Brussels, Belgium, 2012.
2. «Energy Technology Perspectives 2012 - Pathways to a clean energy system». Published by International Energy Agency, 2012.
3. Mendes de Paula, G.; «Previsão controversa - Conclusão da IEA de que aciaria elétrica responderá por mais de 50% da produção de aço gera polêmica». Revista ABM - Metalurgia, Materiais e Mineração, Jan/Fev 2013, p. 21.
4. Madias, J.; «Procesamiento de chatarra para acerías». Acero Latinoamericano, Julio-Agosto 2011, pp. 48-56.
5. «Profile of West-Japan Auto Recycle Co. Ltd. (WARC)». The 12th Northeast Asian Conference on Environmental Cooperation, November, 2003, Toyama, Japan, pp. 187-189.
6. «2011 world direct reduction statistics», MIDREX, second quarter 2012, en www.midrex.com, visitado en abril de 2013.
7. Hornby Anderson, S. «DRI: The EAF energy source of the future?», in http://www.metallics.org.uk/PDF_library/2002-3.pdf, visitado en abril de 2013.
8. http://www.energiron.com/pro_hytemp.html, visitado en abril de 2013.
9. Siqueira Nunes, E.; Biancardi Guimarães de Oliveira, E.; de Oliveira, J.R.; Costa da Silva Filho, T.; Costa da Silva, T.; «Processo de desfosforação de ferro-gusa em panela aplicado na Siderúrgica Ibiraçu». 42° Seminario de Acería de ABM, Belo Horizonte, Brasil, mayo de 2012.
10. «Siderúrgica Fergumar instala processo de desfosforação de gusa». Jornal Sidergusa on line, 19 de abril de 2006, en www.jornalsidergusa.blogspot.com.br/2006/04/sidergusa-fergumar-instala-processo-de.html, visitado en marzo de 2013.
11. 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.
12. 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.
13. Tang, J.; Wuxi, X.; Bianchi Ferri, M. Argenta, P.; «Charging hot metal to the EAF using Consteel». Milennium Steel 2006, pp. 79-86.
14. Duan, J.-P.; Zhang, Y.-L.; Yang, X.-M.; «EAF steelmaking process with increasing hot metal charging ratio and improving slagging regime». International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Vol. 16, No. 4, August 2009, pp. 375-382.
15. Kempken, J.; Emling, B.; «X-Melt CONARC technology - Metallurgy with future-oriented flexibility». AISTech 2010 Proceedings.
16. «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 de 2013.
17. Kotchen, J.K.; «EAF processes and equipment - Some are lost, but not forgotten». AISTech 2011 Proceedings - Volume I, pp. 887-897.
18. Madias, J. «Recuperación de energía en hornos eléctricos de arco». Acero Latinoamericano, Julio-Agosto 2010, pp. 34-41.
19. 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.
20. Abel, M.; Domdorf, M.; Hubers, H.-J.; «Simetal EAF Quantum - The future approach for efficient scrap melting». 43er Seminario de Acería de ABM, Belo Horizonte, Brasil, mayo 2012, pp. 124-133.
21. «Mexican steelmaker the first to employ Siemens' new Simetal EAF Quantum furnace: Tyasa has ordered a complete compact steelmaking plant». Gacetilla de prensa, Siemens Metal Technologies, Linz, Austria, febrero de 2012.
22. Patrizio, D.; Cappellari, G,; «One bucket charging Fast Arc in Jacksonville». 41° Seminario de Aceríia de ABM, Resende, Brasil, mayo de 2010, pp. 616-626.
23. 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.
24. 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.
25. Wolfe, L.; Johnson, Ph.; «The future of lime for steelmaking». AISTech 2004 Proceedings - Volume I, pp. 1033 -1042.
26. Klippel, T.; Miller, R.; Counce, J.; Shver, V.; Stanton, D.; Brown, J.; «Results of Gerdau Ameristeel Jackson EAF operation with PTI, Inc. LimeJet injection system». AISTech 2009 Proceedings - Volume I, pp. 585-592.
27. Marques Raposo, S.; Lubbe, J.; Memoli, F.; Manenti, A.; «Results of the installation of the KT side-wall injection system for oxygen, carbon and lime at the Consteel EAF Gerdau Ameristeel Sayreville, NJ». 15th IAS Steelmaking Conference, 2005, San Nicolas, Argentina, pp. 467-476.
28. 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.
29. «The future of electrode control». Siemens brochure, www.industry.siemens.com, visitado en abril de 2013.
30. Gilgrass, S.; Scipolo, S.; Zuliani, D.; Clerici, P.; Pustorino, M.; «iEAF technology: The use of offgas analysis for carbon and temperature prediction in electric arc furnaces». AISTech 2012 Proceedings, pp. 727-734.
31. Schliephake, H.; Born, C.; Granderath, R.; Memoli, F.; Simmons, J.; «Heat recovery for the EAF of Georgmarienhütte, Germany». AISTech 2010 Proceedings - Volume I, pp. 745-752.
32. Born, C.; Granderath, R.; «Benchmark for heat recovery from the offgas duct of electric arc furnaces». MPT International 1/2013, pp. 32-35.
33. Chul, L.H.; «Energy recovery in mini-mills», en www.steldaily.co.kr, visitado en abril de 2013
34. «TISCO orders China's first X-Melt CONARC with energy recovery system from SMS Siemag». www.SteelNews.com, January 2013.

Referencias recuadro

1. Lule, R.; López, F.; Torres, R.; Conejo, A.N.; Morales, R.D.; «Operational results during the melting of 100% DRI of high carbon/high metallization at IMEXSA». Iron & Steel Maker May 2001, pp. 47-52.
2. Uyen, J.; «Proceso a puerta cerrada en el horno eléctrico de Corporación Aceros Arequipa». Hierro y Acero AIST México pp. 5-10.
3. Lee, M.; Trotter, D.; Mazzei, O.; Fruehan R.; «Processing high phosphorus HBI in steelmaking». 1997 Ironmaking Conference Proceedings, pp. 571-577.
4. Aranda, V.; Cicutti, C.; Medina, F.; «Comportamiento del fósforo en el horno eléctrico». 15ª Conferencia de Acería del IAS, San Nicolás, Argentina, Noviembre de 2005, pp. 57-66.
5. de Oliveira Paula, A.; Martins Araújo, A.; Ribeiro, S.R.; Coelho Furtado T.L.; de Souza Lima, W.L.; «Aciaria elétrica e utilização de gusa líquido». 42° Seminário de Aciaria da ABM, Salvador, Brasil, maio 2011, pp. 792-800.
6. Barros Ribeiro, D.; Ventura, M.D.; Giacomin, M.C.; Sena de Oliveira, S.; «O uso de gusa verde (sólido e líquido) nas aciarias elétricas». Apresentação no VI Painel sobre a indústria de gusa a carvão vegetal, 43° Seminário de Redução da ABM, setembro 2012, Rio de Janeiro, Brasil.
7. Lule, R.; López, F.; Espinoza, J.; «El uso de arrabio líquido en el EAF, la última experiencia en ArcelorMittal Lázaro Cárdenas Flat Carbon».
8. Basone, J.C.; Suligoy, M.; Guaraglia, H.; Torre, F.; Martini, R.; Beltramone, J.; Fabi, M.; «Reducción del power on en hornos eléctricos de ACINDAR». 17th IAS Steelmaking Conference, Campana, Argentina, November 2009, pp. 79-88.
9. Rondini, N.; Memoli, F.; de Oliveira Amaral Mello, L.G.; «Start up of the VSB meltshop: The first Consteel-EAF in Brazil». AISTech 2012 Proceedings pp. 767-775.
10. www.sidertech.sidertech.com, visitado en abril de 2013.
11. Villanova, E.; Rocha. C.R.; Seixas Breda, D.; Araújo, P.C.; de Assis Carvalho, R.; de Matos Silva, G.C.; Rodrigues Soares, P.; «Análise

do comportamento energético de um forno elétrico a arco». 67° Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, Brasil, julho-agosto 2012, pp. 4345-4352.

12. Jaccard, L.R.; «Principios básicos para definición de los parámetros eléctricos operacionales de los hornos de arco. Diferenciación según la etapa de fusión. Efectos sobre el flicker, la productividad y el consumo de electrodos». 15th IAS Steelmaking Conference, San Nicolas, Argentina, November 2005, pp. 79-88.
13. Bergman, K.; González, R.; Pedroza, M.A.; Herrera, M.; «Twin-cathode DC EAF concepts and results at Hylsa, Mexico». La Revue de Métallurgie - CIT Janvier 2001, pp. 55-62.
14. Menéndez Sandit, M.A.; «Experiencia con operación de eléctrica de hornos CA y CD en Ternium México». CONAC 2010, Monterrey, México.
15. Ortega, J.; Solís, H.; Vásquez, J.; Llanes, R.; Jaccard, L.R.; «Modernización y optimización del horno 5 de la acería de planchones de SIDOR». 14th IAS Steelmaking Conference, San Nicolas, Argentina, November 2003, pp. 510-518.
16. Memoli, F.; Vásquez, J.A.; Gonçalves de Abreu, J.; Daniele Dalmoro; M.; «Experiência da partida do novo FEA de 32 ton da Gerdau Siderperú», 42° Seminário de Aciaria da ABM, Salvador, Brasil, maio 2011, pp. 730-741.
17. «Injeção submersa de oxigênio otimiza forno elétrico». Revista ABM - Metalurgia Materiais e Mineração, Vol. 69, Jan/Fev 2013, p. 18.
18. Lara, A.; Khan, M.; Evenson, E.; Negru, O.; «Resultados del sistema Goodfellow EFSOP em Hylsa Planta Norte». CONAC 2003, Monterrey, México.
19. Ferro, L.; Palma, M.; Maiolo, J.; Memoli, F.; «EAF process optimization based on continuous analysis of off-gases and real-time control of chemical package parameters: The case of TAMSA». 36° Seminário de Aciaria da ABM, Vitória, Brasil, maio 2006, pp. 11-19.
20. Carrasco, G.; Difiore, G.; Oropeza, M.; Landaeta, F.; Ucar, J.; «Sistema supervisorio para hornos de arco eléctrico DATARC y su aplicación en la operación eficiente con dosificación continua de briquetas». 13th IAS Steelmaking Seminar, November 2001, Buenos Aires, Argentina, pp. 522-528.
21. Meireles Santiago, F.; La Bruna, E.; «State of the art furnace control system - An integrated solution for automation and control systems». AISTech 2005 Proceedings - Volume I, pp. 517-523.
22. D'Oliveira, C.; «Control automático de fusión para los EAF de SIDOR». 14th IAS Steemaking Conference, San Nicolás, Argentina, November 2003, pp. 570-574.
23. Martell, F.; Mendoza, R.; Llamas, A.; Micheould, O.; «Increasing energy efficiency of the electric arc furnace at Tenaris-Tamsa». AISTech 2012 Proceedings, pp. 793-803.
24. Martins Soares, R.L.; Vinha, A.; Medeiros de Freitas, M.; Maciel Pereira, A.; Parreira Barci, D.; «Redução do consumo de eletrodos no forno elétrico a arco da usina Grande Vitória - Belgo». 34° Seminário de Aciaria da ABM, Salvador, Brasil, maio 2004, pp. 11-28.
25. Basone, J.C.; Suligoy, M.; Guaraglia, H.; Pucchio, L.; Saura, G.; Lagier, M.; Godoy, O.; «Evolución vida del delta refractario de hornos eléctricos de ACINDAR». 17th IAS Steelmaking Conference, Campana, Argentina, November 2009, pp. 49-52.
26. Correa do Nascimento, C.; Wainerach Scal, M.; Adilson de Castro, J.; «Estudo dos parâmetros de influência no rendimento metálico de uma aciaria elétrica». 40° Seminário de Aciaria da ABM, São Paulo, Brasil, maio 2009, pp. 313-324.
27. Dieter, N.; Barrientos, A.; Moreno, T.; Peredo, M.; Saavedra, R.; «Disminución de las pérdidas metálicas en la acería de Gerdau Aza Planta Colina» 14th IAS Steelmaking Conference, San Nicolás, November 2003, pp. 528-536.
28. Galarza, L.; Mierez, J.; «Avances en la efectividad general del área de hornos eléctricos de SIDOR a través de una adecuada gestión de mantenimiento». 15th IAS Steelmaking Conference, San Nicolás, Argentina, November 2005, pp. 658-666.
29. Luque, H.; Soldati, S.; Ronconi, M.; Lucero, S.; «Disminución de interrupciones debido a perforaciones en paneles refrigerados de bóveda causadas por splashing y arco eléctrico». 7th IAS Ironmaking Conference, Campana, Argentina, November 2009, pp. 234-242.
30. Vázquez Gutiérrez, S.V.; Esparza Carreño, R.; «El porqué ellos sí y nosotros no. Ahora, el porqué nosotros sí y ellos...». CONAC 2001, Monterrey, México.
31. Bravo, J.; García, A.; Abad, G.; Leonhardt, O.; Ordóñez,H.; «Mejoras para lograr rentabilidad en la acería de ANDEC». 13th IAS Steelmaking Seminar, Buenos Aires, Argentina, November 2001, pp. 538-544.
32. Revuelta Capablanca, C.; Sardinas Valdés, G.; Sustitución en el EF 1 de la programación original a través de un know how propio». 13th IAS Steelmaking Seminar, Buenos Aires, Argentina, November 2001, pp. 514-520.
33. Lule, R.; López, F.; Rodríguez, R.; Conejo, A.M.; «Recycling MgO-C refractory in the EAF of Mittal Steel Lázaro Cárdenas». Iron & Steel Technology, February 2006, pp. 76-84.
34. Soares Ferreira Coelho, M.T.; Garcia de Campos, J.M.; Aquino do Amaral. E.; Terra Elías, F.; Granado, E.; Alencastro Araújo, J.; «Reciclagem de cal de panela no forno elétrico a arco da ArcelorMittal Piracicaba». 42° Seminário de Aciaria da ABM, Salvador, Brasil, maio 2011, pp. 427-435. alacero