



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

Simulación de la Metalurgia en el Convertidor LD

Autor: Jorge Coma García

Tutor: Francisco Blanco Álvarez

Oviedo, junio de 2016



1. Introducción.....	1
1.1. Objetivos.....	2
2. El proceso siderúrgico	4
2.1. Evolución del proceso siderúrgico	4
2.1.1. Natuleza del mineral.....	4
2.1.2. Orígenes	4
2.1.3. Forja Catalana.....	6
2.1.4. Horno Osmund y Stuckofen.....	7
2.1.5. Flussofen: el primer horno alto	9
2.1.6. Coque mineral	9
2.2. El proceso siderúrgico en la actualidad.....	11
2.2.1. Materias primas.....	14
2.2.2. Horno alto.....	15
2.2.3. Acería.....	15
2.2.4. Laminación.....	16
3. La acería	17
3.1. Función	17
3.2. Evolución.....	18
3.2.1. Convertidor Bessemer	19
3.2.2. Convertidor Thomas.....	21
3.2.3. Horno Siemens	23
4. El Proceso LD	27
4.1. Instalaciones.....	28
4.1.1. Cuchara.....	29
4.1.2. Convertidor LD.....	30
4.1.3. Lanza de inyección de oxígeno.....	32
4.1.4. Sublanza	33
4.2. Materiales	34
4.2.1. Arrabio.....	34
4.2.2. Chatarra.....	35
4.2.3. Mineral.....	36
4.2.4. Fundentes.....	36
4.2.5. Oxígeno.....	37
4.3. Secuencia de operaciones.....	38



4.3.1.	Cálculo de la carga	38
4.3.2.	Carga del convertidor	38
4.3.3.	Soplado de oxígeno.....	39
4.3.4.	Colada del acero.....	40
4.4.	Etapas en la conversión.....	41
4.4.1.	Periodo de oxidación del silicio	41
4.4.2.	Periodo de decarburación creciente.....	41
4.4.3.	Periodo de decarburación decreciente y oxidación del metal.....	41
4.5.	Sistema LBE	43
4.5.1.	Periodo inicial.....	44
4.5.2.	Periodo final	44
4.5.3.	Soplado metalúrgico	44
5.	Reacciones en el convertidor	45
5.1.	Oxidación del hierro.....	45
5.2.	Eliminación del silicio.....	45
5.3.	Eliminación del manganeso	46
5.4.	Eliminación del carbono	46
5.5.	Eliminación del fósforo	46
5.6.	Eliminación del azufre	47
6.	Balances de masa y energía	49
6.1.	Balance de masa.....	51
6.1.1.	Balance de hierro	52
6.1.2.	Balance de Oxígeno	52
6.1.3.	Balance de gas	52
6.1.4.	Balance de elementos de escoria, excepto hierro	53
6.1.5.	Índice de basicidad.....	53
6.1.6.	Balance de magnesia.....	53
6.2.	Balance térmico	53
6.2.1.	Funciones termodinámicas y unidades.....	53
6.2.2.	Principios para el establecimiento del balance térmico	53
6.2.3.	Calentamiento y descomposición de las entradas.....	56
6.2.4.	Reacciones de oxidación	56
6.2.5.	Ajuste de temperatura de las salidas.....	56
6.3.	Cálculo de la carga del convertidor	57



7. Simulación del Convertidor LD.....	60
8. Conclusiones	67
9. Bibliografía.....	69



1. Introducción

La producción de hierro, en forma de aceros y/o fundiciones, ha marcado la historia de la humanidad desde el comienzo de la Edad del Hierro, siendo objeto de estudio gracias a sus numerosas aplicaciones, propiedades mecánicas y abundancia del mineral de hierro en la corteza terrestre. La posibilidad de producir acero de calidad a gran escala fue uno de los factores que más ha contribuido al desarrollo económico.

En los inicios, se empleaban tecnologías muy sencillas y con bajas productividades y se obtenían productos de baja calidad. Con el paso del tiempo, se comprobó que el contenido en carbono afectaba a la resistencia y maleabilidad del metal, desarrollándose técnicas para modificarlo.

Pero no es hasta mediados del siglo XIX, con el desarrollo del convertidor Bessemer, que la producción siderúrgica deja de ser artesanal y se comienza a producir acero bajo en carbono con buenas propiedades mecánicas a gran escala. Las posteriores modificaciones y diferentes convertidores que aparecieron a lo largo de los años fueron mejorando el proceso, la productividad y la calidad del acero. Actualmente el proceso de conversión, reducción del contenido en carbono del arrabio procedente del horno alto para producir acero, se realiza mayoritariamente mediante el proceso LD.

El proceso siderúrgico en la actualidad se centra en la producción de acero, una aleación de hierro y carbono. Para que se denomine acero, el contenido en carbono debe estar comprendido entre 0,008% y 2%. Para contenidos inferiores se considera hierro puro y por encima fundición.

Esta aleación presenta además otros elementos que pueden ser beneficiosos o perjudiciales, siendo necesario controlar el contenido de aquellos que empeoren la calidad del acero. Algunas adiciones que se emplean son manganeso, cromo, silicio, etc. Mediante la adición de estos elementos se pueden obtener materiales con diferentes propiedades para cumplir las exigencias de cada aplicación.

Existen actualmente dos procesos siderúrgicos predominantes, el proceso siderúrgico integral y el del horno eléctrico de arco. En el proceso siderúrgico se emplean como materias primas mineral de hierro, carbón y fundentes, que deben ser



sometidas a una preparación antes de introducirse al proceso. El mineral de hierro debe presentar una granulometría y pureza adecuadas y el carbón es coquizado.

Dado que el hierro no se establece en estado puro, no se presenta en la naturaleza como tal, sino en forma de óxidos. El oxígeno presente en el mineral se elimina en el horno alto mediante la reducción con coque. Durante el proceso de reducción, el arrabio (producto obtenido del horno alto compuesto mayoritariamente por hierro) se enriquece en carbono hasta niveles superiores al 4%, se trata por tanto de una fundición. Junto a hierro y carbono contiene otros elementos perjudiciales que deben ser eliminados, azufre, fósforo y silicio principalmente.

En la acería se convierte el arrabio en acero, eliminando el exceso de carbono, fósforo y silicio en el convertidor. La desulfuración se realiza generalmente durante el transporte entre el horno alto y el convertidor. En la metalurgia secundaria se ajusta la composición del acero y, a continuación, se solidifica en desbastes largos de sección constante. Los semiproductos solidificados son laminados y sometidos a tratamientos de acabado antes de su comercialización.

1.1. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es estudiar en profundidad la metalurgia en el Convertidor LD. Para ello se realiza una simulación del proceso de afino en un convertidor de 250 t empleando el simulador *Basic Oxygen Steelmaking* (Steel University).

Antes de realizar la simulación es necesario disponer de un conocimiento del proceso LD. Por tanto, se estudia de forma somera el proceso siderúrgico completo para, una vez entendido el papel y la importancia de la conversión en el proceso, estudiar detalladamente el proceso de conversión en la acería, instalaciones, materiales, secuencias de operación, etapas del proceso y reacciones que tienen lugar durante el afino.

La información obtenida durante esta fase de estudio permitirá plantear los balances de masas y de energía necesarios para realizar la simulación. Con ellos se



analizan las entradas y salidas de material en el convertidor, con el fin de conocer los materiales que deben introducirse en la simulación para cumplir los requisitos de conversión.

Por tanto, aunque el objetivo final del trabajo es simular la metalurgia en el Convertidor LD, son necesarios unos pasos previos para poder llevarla a cabo. Esto implica que se planteen además unos objetivos secundarios, que son la comprensión del proceso siderúrgico, conocimiento en detalle del proceso de conversión y el planteamiento y resolución de los balances de masa y energía.



2. El proceso siderúrgico

2.1. Evolución del proceso siderúrgico

La historia de la fabricación de hierro comienza en torno al 3.500 a.C. según los descubrimientos arqueológicos realizados hasta la fecha. El uso de este metal fue muy posterior a otros como el cobre, el estaño, el oro o la plata, debidos a las mayores dificultades que presenta su elaboración. A continuación se presenta brevemente la evolución del proceso de elaboración de hierro a lo largo de la historia, de manera que conociendo los fundamentos físicos y químicos y las tecnologías empleadas se pueda comprender el proceso actual .

En primer lugar es necesario comprender el comportamiento del mineral de hierro en la naturaleza para posteriormente entender los procesos de elaboración de piezas utilizados.

2.1.1. Natuleza del mineral

El hierro puro no es estable a temperatura ambiente, sino que tiende a oxidarse. Los óxidos formados son magnetita (Fe_3O_4 , relación en peso entre el oxígeno y el hierro es 0,38) y hematites en condiciones de máxima oxidación (Fe_2O_3 , relación en peso entre el oxígeno y el hierro es 0,43). El hierro también puede formar Wustita (FeO , relación en peso entre el oxígeno y el hierro es 0,22) al oxidarse pero este óxido no es estable a temperatura ambiente.

En los yacimientos, los óxidos de hierro están acompañados de otros elementos como el manganeso y el fósforo. El mineral se encuentra también mezclado con gangas de diferentes naturalezas, como arenas, arcillas o rocas silíceas o calcáreas. El objetivo de la siderurgia es eliminar la ganga y los elementos perjudiciales presentes y mantener o añadir aquellos que sean beneficiosos.

2.1.2. Orígenes

Los primeros objetos de hierro fueron elaborados a partir de nódulos de hematites en Egipto en torno al 3500 a.C. Más adelante se extrajo el metal de meteoritos



que contenían hierro y níquel, que comprenden en torno al 6% de los meteoritos que caen en la Tierra. Esta fuente metálica se puede identificar por su estructura cristalina Widmanstätten característica, que se mantiene si el metal es tratado a baja temperatura. Los primeros objetos creados tenían un carácter ceremonial u ornamental, dado que el hierro meteorítico es escaso y el metal obtenido era muy caro.

El proceso de obtención de hierro útil a partir de sus óxidos es más complicado que el de otros metales como cobre y estaño, que pueden ser trabajados en frío o fundidos en hornos sencillos. La fundición de hierro, en cambio, requiere trabajo en caliente y solamente se puede fundir en hornos especialmente diseñados. Por lo tanto, es comprensible que la tecnología de fabricación de hierro fundido no se haya dominado hasta varios milenios después que la metalurgia del bronce.

No se conoce con exactitud el lugar y la época del descubrimiento de la fundición de hierro, en parte debido a la dificultad de distinguir el metal extraído de minerales que contienen níquel del producido a partir de hierro meteorítico trabajado en caliente. Los descubrimientos arqueológicos parece apuntar a la zona de Oriente Medio, durante la Edad del Bronce en el 3º milenio antes de Cristo. Sin embargo los objetos de hierro escasean hasta el siglo 12 a.C.

La edad de hierro se define convencionalmente por el uso generalizado de las armas de acero y herramientas, desplazando al bronce. Esa transición ocurrió en diferentes momentos en los diferentes lugares, según la tecnología se extendió por el Viejo Mundo. Mesopotamia está plenamente en la edad de hierro en el 900 a.C. En Egipto el bronce se mantuvo dominante hasta la conquista asiria en el 663 a.C. La edad de hierro comenzó en Europa central en torno al 500 a.C. y en la India y China en algún momento entre 1200 y 500 a.C.

La producción de hierro se realizaba originalmente en hornos donde se empleaban fuelles para forzar el aire a través de una pila de mineral de hierro y carbón vegetal. El monóxido de carbono producido por la combustión del carbón reduce el óxido de hierro a hierro metálico.

Estos hornos no alcanzaban temperaturas suficientes para fundir el hierro, por lo que el metal se recogía en la parte inferior del horno en forma de una masa esponjosa. Los trabajadores rellenaban a continuación los poros de la esponja con cenizas y



escorias. Luego se recalentaban para ablandar el hierro y fundir la escoria y se golpeaba repetidamente para forzar la salida de la escoria fundida. Se trata de un proceso laborioso y que requiere de mucho tiempo para producir hierro forjado, una aleación maleable y bastante blanda.

Al mismo tiempo que tuvo lugar la transición de la edad de cobre a la de hierro tiene lugar el descubrimiento de la carburización, el proceso de añadir carbono al hierro forjado.

La esponja hierro contenía una pequeña cantidad de carbono. Herreros en Oriente Medio descubrieron que el hierro forjado se podría convertir en un producto mucho más duro por calentamiento en un lecho de carbón vegetal de la pieza conformada y luego enfriamiento en agua o aceite. Este procedimiento convierte las capas exteriores de la pieza en acero, una aleación de hierro y carbono, más duro y menos frágil que el bronce que empezó a reemplazar.

Los diferentes equipos que se emplearon hasta la Edad Media para la producción de esponja de hierro tenían que ser desmontados después de cada lote. Este hecho, junto a su pequeño tamaño, hacían que tuviesen bajas productividades.

2.1.3. Forja Catalana

En el siglo VII las pequeñas forjas de las montañas de Cataluña presentaron uno de los primeros avances significativos en la metalurgia del hierro en Europa. La Forja Catalana temprana tenía un hogar de piedra, de unos 0,75 m de altura y 0,9 m de diámetro. Ligeramente por encima de la base había una pequeña abertura que permitía que una boquilla, conocido como una tobera, fuese instalada. La tobera se conectaba a un fuelle accionado por un operador para suministrar aire. El hogar se llenaba hasta el nivel de la tobera con trozos de carbón vegetal. El mineral de hierro se colocaba por encima de la tobera y, por encima del mismo, una nueva capa de carbón vegetal. La masa de esponja de hierro resultante, de hasta 160 Kg, se podía retirar del hogar sin destruir la estructura de piedra. Esta cantidad de hierro se podía producir en cinco horas, mientras que las tecnologías anteriores sólo podían lograr apenas 20 Kg, lo que muestra la gran ventaja de de esta tecnología en términos de productividad.



El aumento de tamaño de la Forja Catalana estuvo vinculado a la introducción de sistemas de accionamiento hidráulico para el soplado de aire, que entregaban flujos de aire y presiones mucho más elevados de los que los fuelles lograban producir. Estos equipos se basaban en el efecto Venturi o en la rueda hidráulica.

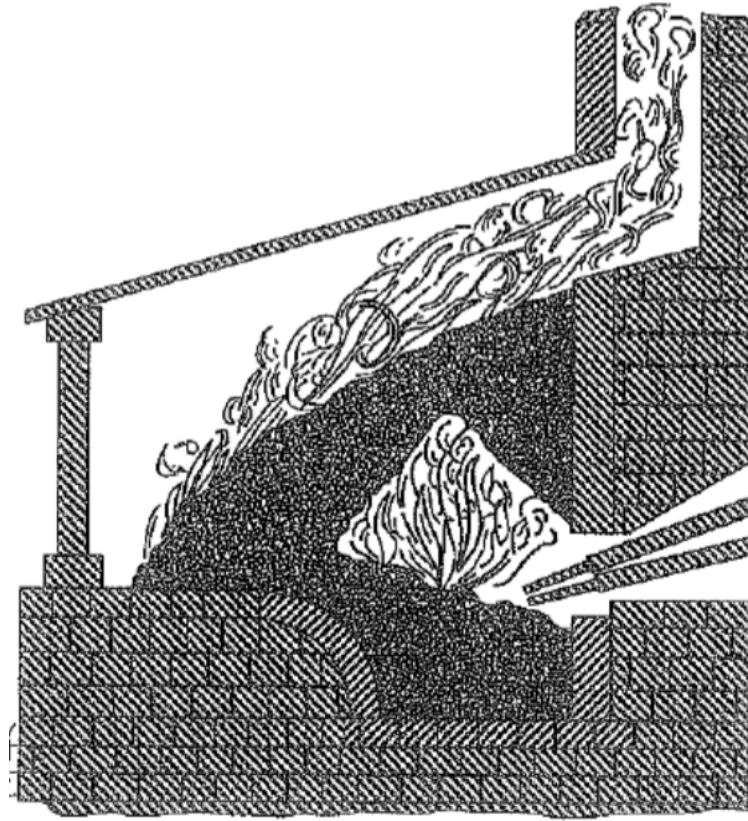


Fig. 1: Forja Catalana (Ricketts, 2000)

Entre el año 900 y el 1300 la Forja Catalana se modificó en diversas regiones, aprovechando la utilización de fuelles accionados por agua, para construir pilas más altas y lograr mayores productividades.

2.1.4. Horno Osmund y Stuckofen

Entre los sucesores de la Forja Catalana se encuentra el horno Osmund en Suecia, cuya pila medía entre 2,0 y 2,4 m y tenía una gran abertura en la parte superior y era cónico hacia abajo con un diámetro menor del hogar.

El Stuckofen fue muy común a lo largo del río Rin en Alemania. Estaba compuesto por un conducto de piedra de 3,0-4,8 m de altura. El conducto tenía la forma



de dos conos truncados conectados en su diámetro más ancho. Este tipo de hornos se carga manualmente con cestas desde la parte superior y se operaba con dos toberas, ya que la rueda de agua movía dos fuelles con uno de ellos siendo comprimido en todo momento para producir la llama.

En la parte inferior del horno había una abertura para extraer la escoria. La escoria debía ser eliminada con frecuencia para que la esponja estuviese siempre en contacto con el carbón vegetal y mantener el proceso de desoxidación, para lograr un producto maleable. Un panel en la parte frontal inferior del horno, se retiraba para extraer el producto final que pesaba de 200 a 300 kg. El Stuckofen podía producir de 100-150 toneladas al año, superando la capacidad de producción de cualquiera de sus predecesores.

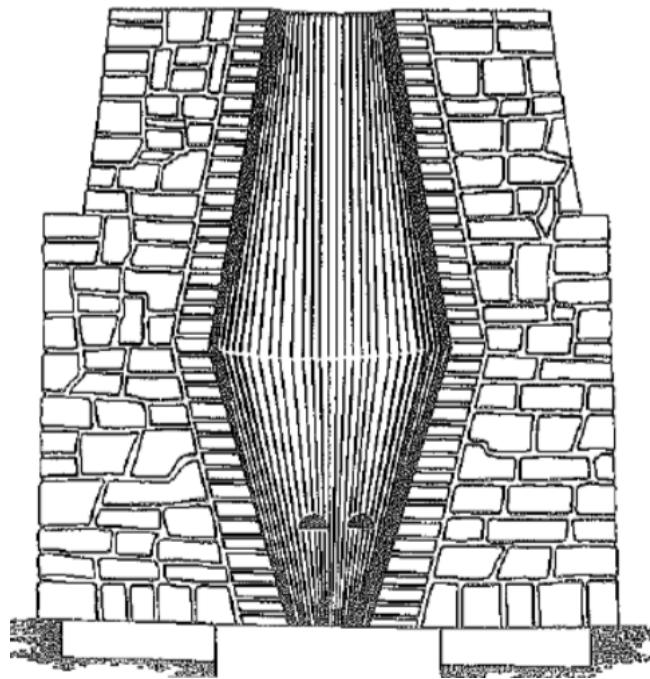


Fig. 2: Stuckofen (Ricketts, 2000)

Un subproducto del stuckofen era hierro líquido; ya que el mineral disponía de un tiempo de residencia mayor debido a la mayor altura del horno estaba sometido a reacciones químicas y mayores temperaturas, que permitían no sólo desoxidar sino también absorber carbono, lo que reducía el punto de fusión. Al extraer la esponja del hogar también se extraía el hierro fundido, que era considerado un deshecho debido a su excesiva fragilidad. En ocasiones se alimentaba al horno para evitar su pérdida.



2.1.5. Flussofen: el primer horno alto

El desarrollo de la fundición de hierro se retrasó en Europa hasta el final de la Edad Media, ya que los hornos sólo podían alcanzar temperaturas de alrededor de 1000°C o tal vez no se querían temperaturas más altas, dado que buscaban producir esponja como precursor de acero dulce, no de hierro fundido.

A causa de un cambio en la tecnología bélica con la introducción de la pólvora y el desarrollo de los cañones, tuvo lugar una evolución en la metalurgia del hierro. La fundición de cañones se convirtió en la industria dominante en lugar de la forja de espadas de hierro esponja.

El último paso en el diseño del horno para producir hierro líquido de forma continua fue el Flussofen en el siglo XIV en el valle del Rin. Su difusión fue relativamente lenta, como indica la ausencia de referencias por Agrícola en su libro "De re metalica" impreso en 1530, a pesar de describir el Stuckofen. Estos primeros Hornos Altos eran similares a los Stuckofens en tamaño y diametro. Las paredes estaba hecha de piedra y el aire era suministrado por dos fuelles accionados por un rueda hidráulica. Las materias primas se cargaban directamente por la parte superior utilizando cestas. Se instaló una compuerta para la eliminación de la escoria y un orificio de colada en la parte inferior para la extracción del hierro fundido. Se instaló adyacente al horno la nave de colada, un techo para evitar que los moldes de arena para el hierro fundido se mojasen y produjesen explosiones. El hogar era generalmente cuadrado y de menores dimensiones que un Stuckofen ya que tenía en su interior un producto más denso: hierro líquido.

2.1.6. Coque mineral

Debido a la deforestación causada por la producción de carbón vegetal, se tuvieron que buscar fuentes alternativas de combustible. Las alternativas empleadas fueron carbón bituminoso, carbón de antracita, coque e incluso turba. El coque y la antracita tuvieron un empleo similar y coexistieron con el carbón vegetal desde 1700 hasta 1800. El uso de carbón bituminoso y turba fue limitado y nunca llegó a ser un combustible importante en la fabricación de hierro. Puesto que los problemas de la



deforestación se produjeron en primer lugar en Gran Bretaña, aquí fue dónde se introdujo el empleo de combustibles minerales en el proceso siderúrgico.

En 1708, Abraham Darby alquiló un pequeño horno alto de carbón vegetal en Coalbrookdale, Shropshire, Inglaterra y en 1709 producía coque partir de carbón mineral, como complemento al cada vez más costoso carbón vegetal. Entonces el coque se producía por métodos similares a los utilizados para la producción de carbón vegetal. Durante la siguiente década, fue aumentando la proporción de coque en la mezcla, hasta que en 1735 produjo hierro empleando únicamente coque como combustible.

Darby no pretendía mantener el uso de este nuevo combustible secreto pero tampoco lo publicó. Hasta 1750 solamente tres hornos altos empleaban coque en su práctica habitual, todos operados por la familia Darby. Finalmente, entre 1750 y 1771 el uso de coque se extendió a 27 hornos en Gran Bretaña.

El coque se introdujo en el proceso para disminuir el coste del combustible y aumentar la temperatura del hierro líquido. Sin embargo, con el tiempo, el coque permitió aumentar la producción y reducir la proporción de combustible. El aumento de energía liberada era utilizado para fundir más mineral y la combustión más profunda del coque frente a las toberas incrementó el volumen eficaz del horno. Ambas características mejoraron la eficiencia y la producción del horno. Otro beneficio que aporta el coque es que es más resistente que el carbón vegetal, por lo que puede soportar un mayor peso de material, permitiendo un aumento en el tamaño del horno. La mejor resistencia mecánica del coque también mejoró la permeabilidad en el horno, lo que permite un mayor flujo de aire a través de él a igual presión. Por el contrario, puesto que el coque es más denso y menos reactivo que el carbón vegetal, también requiere más aire por unidad de peso de combustible quemado. El potencial real de los hornos de coque no se aprovechó hasta que estuvieron disponibles mayores volúmenes de aire comprimido con el desarrollo de la máquina de vapor y los cilindros de soplado.

La fundición obtenida, con un porcentaje en carbono superior al 2% era muy frágil y debía ser oxidado el exceso de carbono para obtener un material suficientemente dúctil y resistente, acero.



2.2. El proceso siderúrgico en la actualidad

En la actualidad se distinguen dos métodos principales de producción de acero: la ruta integral del horno alto o convencional, que representa en torno al 60% de la producción mundial (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007), y la ruta del horno eléctrico de arco (HEA).

La ruta convencional cuenta como parte fundamental con el horno alto, en el que se introducen las materias primas mineral de hierro, coque y fundentes principalmente para obtener arrabio una fundición con alto contenido en carbono.

El arrabio obtenido debe ser desulfurado y tratado en el convertidor para conseguir acero, que será posteriormente sometido a un proceso de afinado en su composición química en la metalurgia secundaria.

Tras conseguir la composición química requerida, el acero es solidificado. La solidificación se realiza principalmente por colada continua, obteniéndose unos productos largos de sección constante denominados slabs, blooms o palanquillas en función de que la sección sea rectangular (slabs) o cuadrada (blooms y palanquillas) y del tamaño de dicha sección. Estos productos son posteriormente sometidos a diferentes procesos de laminación y acabado para obtener las secciones finales deseadas.

La ruta del horno eléctrico de arco se basa en la fusión de chatarra o prerreducidos de hierro en un horno que cuenta con tres electrodos, obteniéndose productos de menor calidad que en la ruta convencional. La principal ventaja que presenta este método es su menor coste e inversión requerida, junto con la posibilidad de reciclar el acero ya descartado. Aunque la ruta convencional también permite reciclar chatarra, principal en el convertidor como refrigerante.

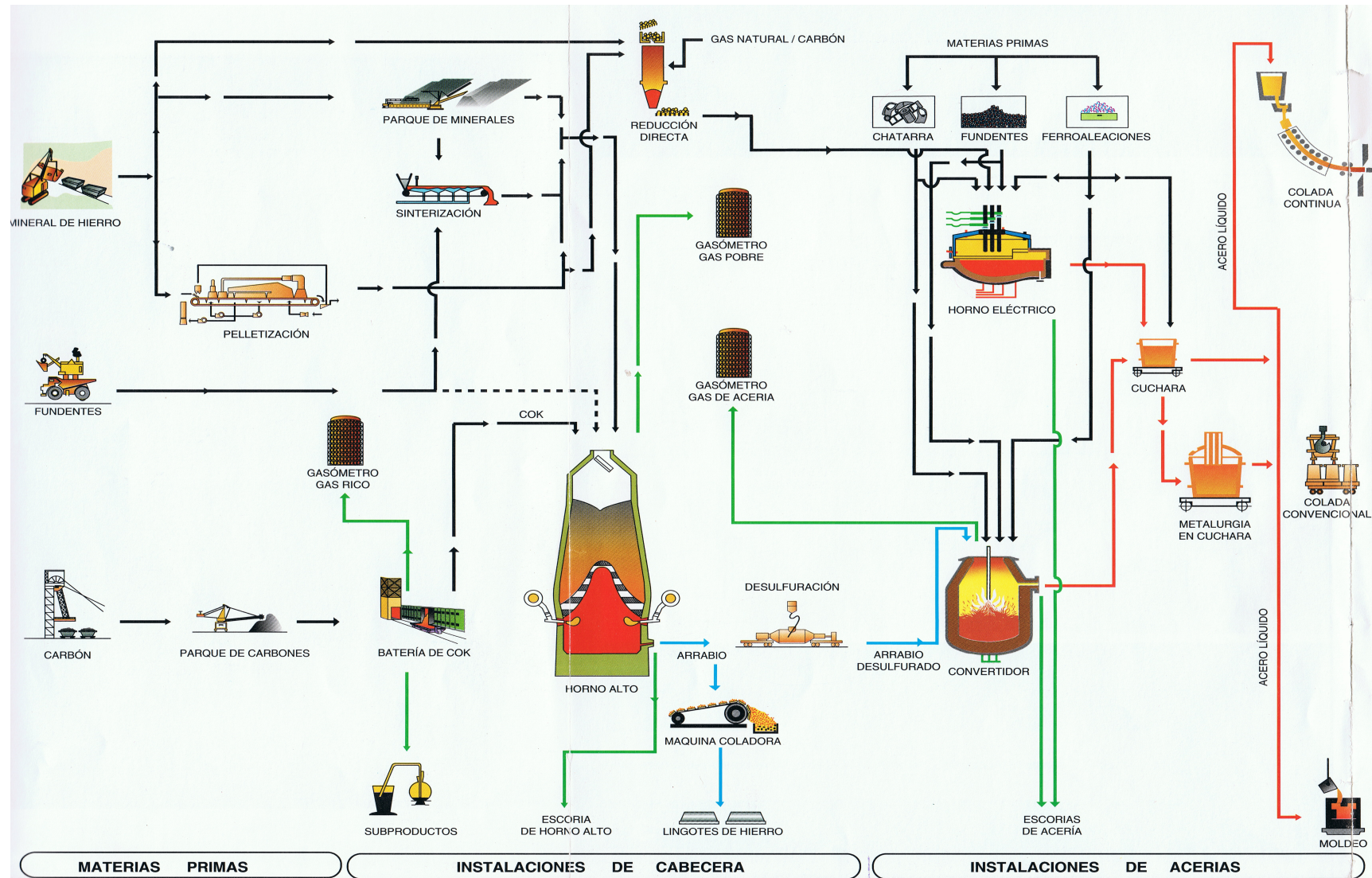


Fig. 3: Procesos siderúrgico integral y HEA, parte 1 (UNESID, 1998)

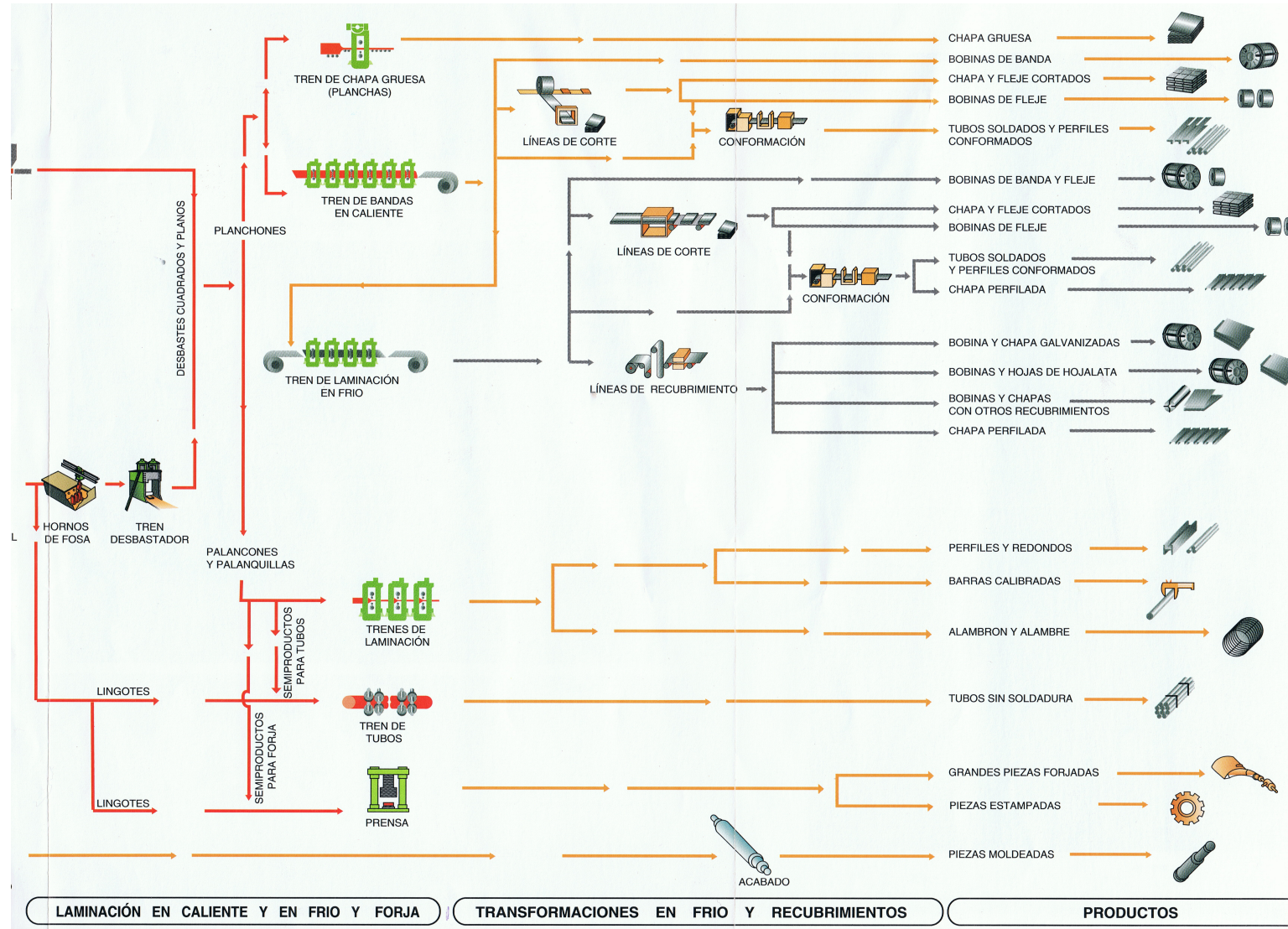


Fig. 4: Procesos siderúrgico integral y HEA, parte 2 (UNESID, 1998)



A continuación se describe en mayor detalle el proceso siderúrgico integral, dado que es el que emplea el convertidor LD para la fabricación de acero y, por tanto, de interés para este proyecto. Se trata brevemente sobre las materias primas empleadas, el horno alto, la acería, laminación y acabado y recubiertos.

2.2.1. Materias primas

Las materias primas utilizadas en la ruta convencional son principalmente: mineral de hierro, carbón coquizable y fundentes.

El mineral de hierro, como ya se mencionó en el **apartado 2.1.1** aparece en los yacimientos en forma oxidada. Para obtener acero, este mineral será reducido en el horno alto. El mineral debe cumplir unas características granulométricas y químicas para ser empleado. Para optimizar el rendimiento del horno se utiliza mineral de hierro aglomerado. El mineral aglomerado se obtiene por sinterización (obtención de Sínter) o peletización (obtención de pellets). Durante el proceso de aglomeración, se añaden al mineral fundentes y coque para favorecer las reacciones.

Los fundentes se añaden al horno alto para reducir el punto de fusión de la escoria y reducir viscosidad. El tipo de fundente empleado (ácido o básico) depende del tipo de mineral empleado y la escoria que producirá. Si la ganga es arcillosa o silicosa se emplea caliza, mientras que si ésta es calcárea debe añadirse arcilla o sílice..

El carbón coquizable desempeña varias funciones en el Horno alto. Su función principal es aportar el carbono para la desoxidación del mineral y carburización del hierro fundido. Adicionalmente, actúa como combustible y soporte de la carga. Antes de introducirse al horno es sometido a un proceso de coquización en cámara cerrada, a alta temperatura y en ausencia de aire. Este proceso se realiza en las baterías de coque, obteniéndose coque siderúrgico, con un contenido en carbono superior al 90% (ArcelorMittal España). Del proceso de coquización se obtiene como subproducto el gas de coque.



2.2.2. Horno alto

El horno alto es el elemento más importante del proceso. Se trata de un reactor vertical en donde tiene lugar la reducción del mineral de hierro, obteniéndose arrabio y escoria.

Con el objetivo de favorecer la combustión, se inyecta aire caliente a gran presión, que además se encarga de sostener la carga. El arrabio obtenido como producto contiene aproximadamente un 95% de hierro y un 3,5% de carbono (ArcelorMittal España), por lo que debe ser decarburado en el convertidor. Además debe minimizarse la cantidad de azufre, siendo generalmente realizada una desulfuración en cuchara.

La escoria producida es la encargada de atrapar las impurezas que se incluyen con el mineral y el coque, formando óxidos y silicatos que flotan sobre el arrabio debido a su menor densidad. Los componentes fundamentales de la escoria son la sílice, la alúmina, la cal y la magnesia.

Además de arrabio y escoria, se obtiene un gas que debe ser tratado y que puede ser posteriormente reutilizado (denominado comúnmente “gas pobre”). Este gas tiene un menor poder calorífico que el gas obtenido en el proceso de coquización, pero es suficiente para realizar un precalentamiento del aire a soplar en el mismo, previo al paso por las estufas.

2.2.3. Acería

Tras desulfurar el arrabio producido en el horno alto, éste se transporta hasta las instalaciones de acería para someterlo a un afino, reducción de su contenido en carbono para obtener acero y ajuste de los elementos de aleación del acero. La acería incluye el convertidor, la metalurgia secundaria y la colada continua del acero.

Convertidor

El método más empleado en la actualidad para decarburar el arrabio es el convertidor LD, también llamado BOF (Basic Oxygen Furnace). Para ello se inyecta un chorro de oxígeno mediante una lanza vertical por la boca del convertidor, que oxida el carbono en exceso presente. Este elemento será estudiado en profundidad en los siguientes apartados.



Metalurgia secundaria

El acero líquido colado del convertidor se dirige a las instalaciones de metalurgia secundaria, donde se ajusta su composición, temperatura, limpieza inclusionar y contenido en gases en función del grado de acero buscado.

Colada continua

Aunque existen más métodos de solidificación, el más empleado en la actualidad es la colada continua. El acero líquido es vertido por un molde vertical sin fondo, cuya sección transversal es la misma que la del semiproducto que se desea fabricar, denominado desbaste. El molde se encuentra refrigerado por agua, solidificando el acero desde la superficie hacia el interior. A la salida del molde, el desbaste recorre una serie de rodillos también refrigerados con agua. Al final de la operación el desbaste se encuentra completamente solidificado y las piezas cortadas a la medida deseada.

2.2.4. Laminación

Los productos solidificados son laminados para obtener la forma y características mecánicas deseadas en la pieza final. La laminación puede realizarse en frío o en caliente. La laminación en caliente tiene lugar cuando ésta se a una temperatura superior a la de recristalización del acero, conservándose la estructura interna y propiedades mecánicas. Cuando la laminación se realiza a una temperatura inferior, es decir, en frío, el acero sufre alteraciones en su estructura interna, siendo necesario un posterior recocido.

La laminación consiste en hacer pasar el desbaste entre dos rodillos, consiguiendo una deformación permanente debido al carácter plástico del acero, en los trenes de laminación.

3. La acería

3.1. Función

En la acería se transforma en acero el arrabio procedente del horno alto, se ajusta su composición y se solidifica.

El acero, según la norma UNE 36-004, es una aleación de hierro y carbono, con un contenido máximo de carbono de un 2%. Para contenidos superiores se tienen fundiciones. El arrabio producido en el horno alto tiene un contenido de carbono entre el 4,0 y el 4,5% (United States Steel, 1998), se trata por tanto de una fundición.

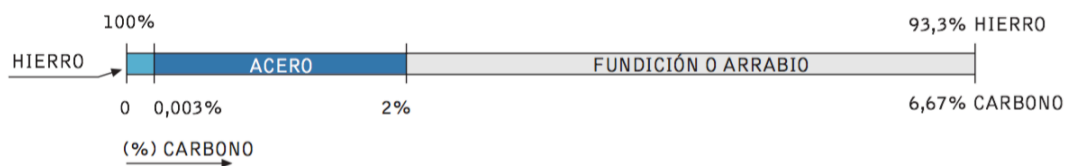


Fig. 5: Rangos de las aleaciones hierro-carbono (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007)

Las aleaciones presentan estructura y comportamiento metálicos, lo que amplía el campo de los metales, consiguiendo nuevos materiales metálicos que cumplen las propiedades físicas y mecánicas deseadas. Pese a que presentan fases a nivel microscópico, a nivel macroscópico la aleación sí se comporta como un metal puro en cuanto a sus propiedades mecánicas.

En el acero y las fundiciones, además de carbono, también aparecen otros elementos. Los elementos que se presentan más comúnmente son manganeso, azufre, fósforo, aluminio, cromo y níquel. Cada uno confiere diversas propiedades, algunos ventajosas y otras perjudiciales, y deberán ser eliminados.

El acero y las fundiciones difieren, además de en su composición, en sus propiedades mecánicas. La fundición es más dura y frágil que el acero.

La industria exige un material que sea simultáneamente duro y maleable para poder ser conformado y no romperse ante esfuerzos súbitos. El acero presenta estas cualidades y, por tanto, tiene un campo de aplicaciones más amplio que el de las fundiciones.



Según su contenido en carbono, los aceros más empleados en la práctica industrial son los que tienen entre un 0,05% y un 0,8%. Los de menor porcentaje son aceros blandos, con destino a aplicaciones que exigen gran maleabilidad y pequeña dureza, como la estampación. Los que se acercan al 0,8% son aceros duros en los que la capacidad de deformación no es tan importante, como los destinados a carriles.

3.2. Evolución

Desde el comienzo del empleo del hierro para aplicaciones útiles, su proceso de fabricación, así como del acero y la fundición, ha sido objeto de estudio y ha evolucionado considerablemente a lo largo de los siglos.

El hierro, el acero y la fundición se diferencian químicamente en el contenido en carbono de cada uno. En la práctica, conviene destacar que el hierro no temple, pero el acero sí. Ambos materiales, hierro y acero, admiten la forja y la laminación, al contrario que la fundición, que es frágil y no admite ninguno de estos procesos.

En lo que se denomina primer periodo de la siderurgia, la fabricación del hierro se hacía directamente por reducción del mineral en una sola etapa. Se obtenían mediante este proceso partículas metálicas en estado sólido o pastoso, de pequeño tamaño y aspecto esponjoso. Estas partículas de hierro se conformaban martilleándolas en caliente, de forma que se producía su soldadura. Este método, que se comenzó a emplear alrededor del 1400 a.C., ha sido empleado aún en el siglo XX por algunos pueblos primitivos de lugares remotos, aunque en general fue abandonado en el siglo XIX.

El segundo periodo de la siderurgia comenzó a mediados del siglo XIV. En él la fabricación del hierro se realiza en dos etapas. En la primera se obtiene de los primeros hornos altos fundición en estado líquido. En la segunda etapa se obtenía el hierro en estado pastoso a partir de la fundición, oxidándola y soldando por fusión las pequeñas partículas en los hornos bajos o de pudelar. La fabricación del hierro en estado sólido o pastoso se abandonó en el siglo XIX.



En 1856 Bessemer descubre la fabricación del hierro y el acero por soplado de la fundición y comienza entonces el tercer periodo de la siderurgia. Por primera vez, el hierro y el acero son fabricados en grandes cantidades y en estado líquido. En 1873 Thomas consigue convertir el hierro colado de alto contenido en fósforo en acero de calidad, empleando un convertidor similar al de Bessemer, pero con un revestimiento básico en lugar del material ácido aplicado hasta entonces. Por último, el desarrollo del proceso Martin-Siemens permite la utilización de chatarra en grandes cantidades.

3.2.1. Convertidor Bessemer

En 1856 el inglés Henry Bessemer descubre la fabricación de hierro y acero mediante el soplado de la fundición líquida, lo que se convertirá en uno de los avances más importantes en la historia de la siderurgia. Es además, después de la invención de la máquina de vapor y del ferrocarril, uno de los hechos que más han contribuido al bienestar de la humanidad.

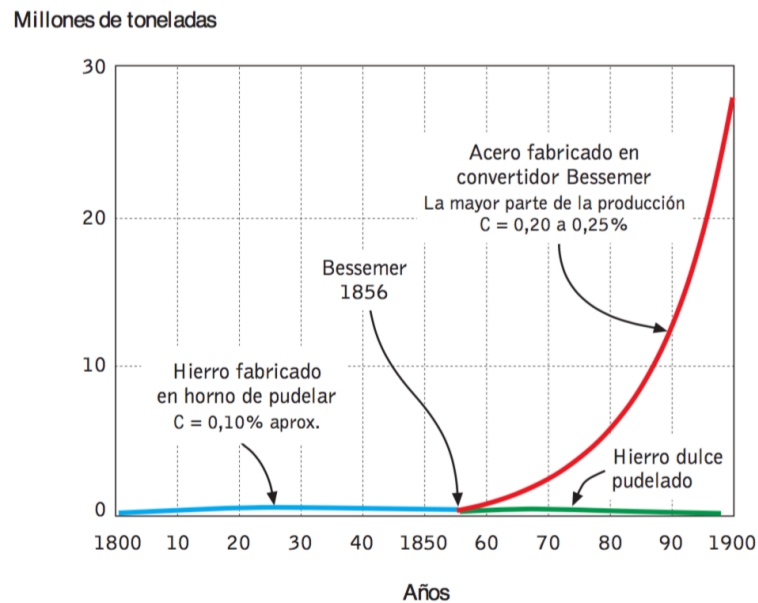


Fig. 6: Influencia de la producción de hierro del Convertidor Bessemer (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007)

Precisamente debido al desarrollo de la máquina de vapor y a la invención del ferrocarril a principios del siglo XIX, la demanda de acero aumentó notablemente, lo que llevó a los técnicos e industriales de la época a buscar nuevos métodos de fabricación que permitieran aumentar la producción y mejorar la calidad.

Aunque desde el año 1847 William Kelly (Estados Unidos) había realizado ensayos sobre el soplado de aire para afinar la fundición, fue Bessemer el primero que logró fabricar acero líquido con este procedimiento.

En un principio, el método de Bessemer consistía en un ventilador que soplaba aire sobre la superficie del arrabio líquido en un horno de pudelar. Con esto se conseguía acelerar la oxidación de la fundición, pero aun así los resultados no fueron muy satisfactorios. Tras varias mejoras sucesivas del procedimiento, se llegó al convertidor Bessemer que se utilizó hasta mediados del siglo XX. Este convertidor consistía en un gran crisol que contenía fundición en estado líquido, a través de la cual se hacía pasar un chorro de aire soplado por el fondo. Así se conseguía la oxidación del silicio, el manganeso, el hierro y el carbono. Los óxidos de silicio, manganeso y hierro se combinaban entre sí dando lugar a silicatos complejos, que por su baja densidad flotaban sobre el baño, formando la escoria. La formación de estos óxidos libera una gran cantidad de calor, por lo que se elevaba la temperatura del baño metálico de 1.250 a 1.650° C, suficiente para mantener el metal fundido durante la operación.

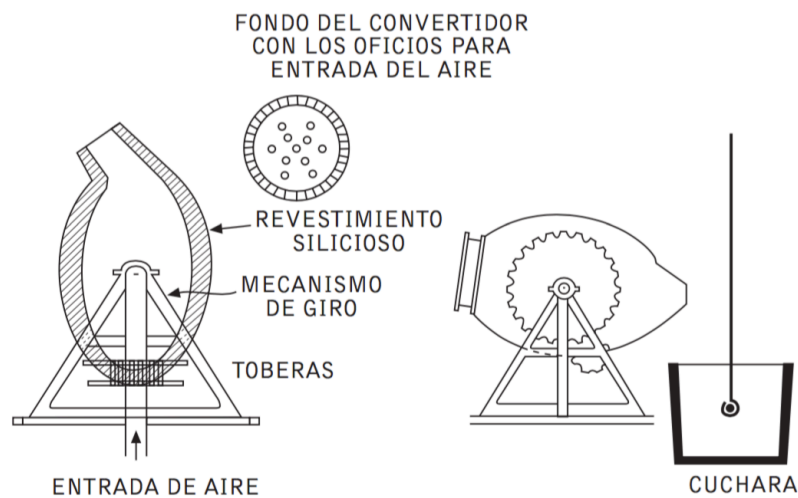


Fig. 7: Convertidor Bessemer (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007)

El contenido de carbono y silicio se reducía con este proceso por debajo del 0,10%, obteniéndose así un producto forjable, resistente y tenaz, que recibió el nombre de acero. Su calidad era además superior a la del obtenido en los hornos de pudelar, puesto que apenas contenía inclusiones metálicas al eliminarse éstas con la escoria.



Además de ser el primer método que permitió fabricar acero a gran escala, alcanzando producciones mucho mayores de las que eran posibles con los hornos de pudelar, el proceso Bessemer presentaba otras ventajas. No sólo el acero era de mejor calidad, sino que también era posible fabricar aceros con distintos contenidos en carbono, variando entre el 0,10 y 0,70%.

Sin embargo, este procedimiento también presentaba inconvenientes. Sólo era posible emplear como material de partida fundiciones con un bajo contenido en fósforo, ya que este elemento se transmitía por completo al acero, dando como resultado un material muy frágil a temperatura ambiente. Tampoco se podía eliminar el azufre y era conveniente vigilar asimismo el contenido en silicio. Los hornos Siemens, ideados poco después que el convertidor Bessemer, proporcionaban aceros de mejor calidad.

Las desventajas del procedimiento Bessemer y la escasez de yacimientos con mineral férrico pobre en fósforo llevaron a la búsqueda de nuevos métodos que mejorasen este convertidor.

3.2.2. Convertidor Thomas

El convertidor Bessemer se empleó con gran aceptación en Suecia e Inglaterra, países que contaban con yacimientos de mineral de hierro con un bajo contenido en fósforo. Sin embargo, otros países industriales, como Francia, Alemania y Bélgica no gozaban de esa ventaja en cuanto a las materias primas, por lo que surgió la necesidad de desarrollar un método de obtención de acero a partir de mineral de hierro rico en fósforo; es decir, un proceso que permitiera eliminar el fósforo a la vez que convertía la fundición en acero.

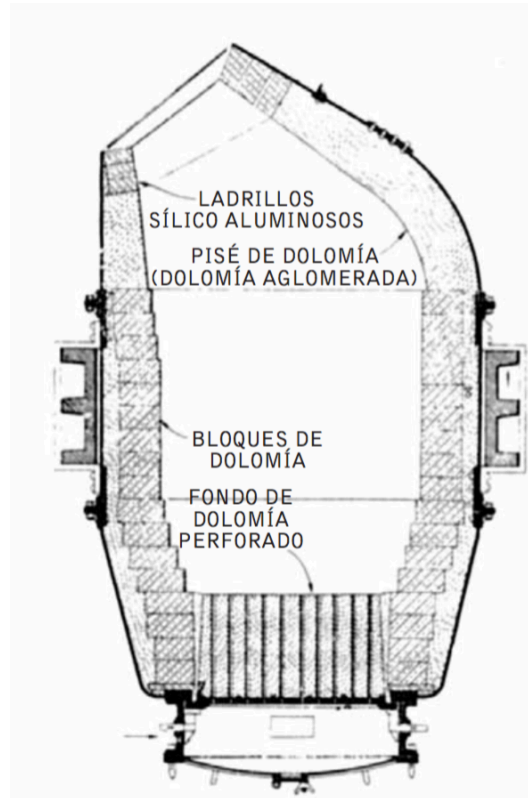


Fig. 8: Convertidor Thomas (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007)

En los convertidores Bessemer, de revestimiento ácido, el fósforo se oxidaba con el aire formando P_2O_5 . Sydney Gilchrist Thomas pensó que este óxido de fósforo se podría eliminar combinándolo con escorias calcáreas si se conseguía salvar el inconveniente de que este tipo de escorias destruirían el revestimiento del convertidor. Así surgió la idea de revestir los convertidores con otro refractario de carácter básico que no reaccionara con la cal.

El convertidor Thomas se presentó en 1879, después de años de ensayos y mejoras. El procedimiento es similar al del Bessemer, pero el convertidor está revestido interiormente con cal y silicato sódico, aglomerados con algo de arcilla. De esta manera se podía obtener acero de buena calidad a partir de fundiciones fosforosas y empleando escorias básicas. Más tarde se mejoró el convertidor revistiéndolo con dolomía calcinada.

Aunque el método de fabricación del acero en el convertidor Thomas es similar al del Bessemer, existen algunas diferencias en cuanto a las reacciones químicas que tienen lugar. En el proceso Bessemer, el silicio era el elemento que aportaba una mayor



cantidad de calor al oxidarse, mientras que en el Thomas es la oxidación del fósforo la que proporciona este calor.

Por otra parte, en el convertidor Bessemer la escoria (óxidos de silicio, manganeso y hierro) se forma espontáneamente. En el Thomas, sin embargo, se añade cal para formar la escoria y eliminar el fósforo. La oxidación del carbono en el proceso Thomas debe ser casi completa, rebajando su porcentaje hasta llegar aproximadamente a un 0,02% para que se pueda eliminar el fósforo mediante un sobresoplado que se realiza a continuación. De esta manera se oxida el fósforo, formando P_2O_5 , que se combina con la cal previamente añadida al baño y se elimina junto con la escoria. En esta fase de sobresoplado se elimina también algo de azufre por acción de la escoria básica.

En el siglo XX, después de la Primera Guerra Mundial, los convertidores Thomas han sido más utilizados que los Bessemer en casi todo el mundo, si bien merece la pena señalar que existe algún país, como Norteamérica, donde el mineral de hierro es pobre en fósforo, por lo que nunca se llegó a emplear este proceso.

3.2.3. Horno Siemens

La mayor parte del acero fabricado entre 1898 y 1968 fue fabricado en hornos Siemens. Aunque desde principios del siglo XIX se llevaron a cabo ensayos para la fabricación de hierro y acero a partir de chatarras de hierro, acero y fundición, no se logró hasta el año 1865, cuando Pierre Martin fabricó acero en un horno de solera provisto de los regeneradores de calor ideados por Siemens.

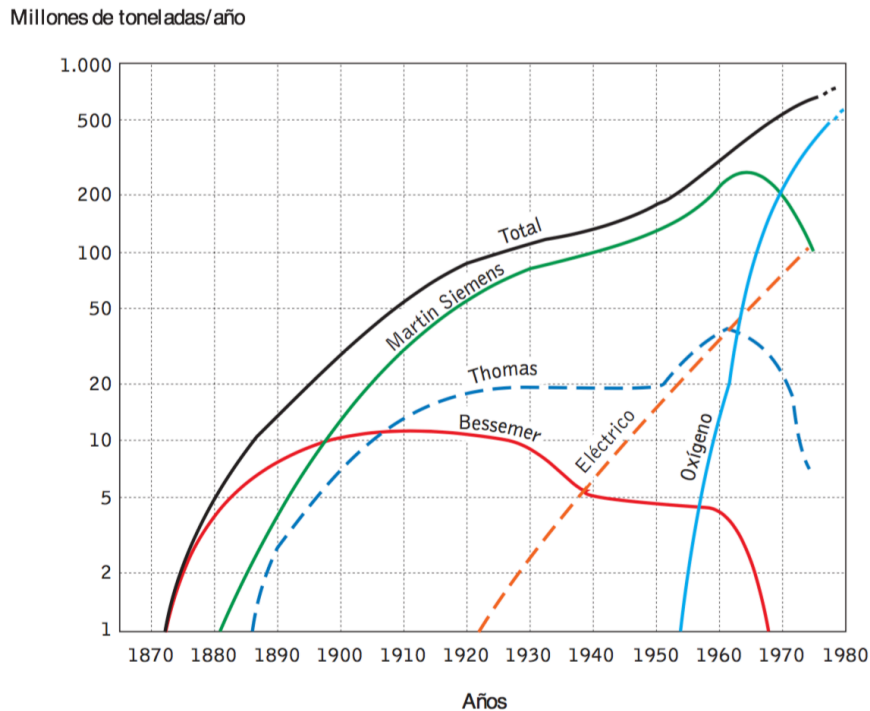


Fig. 9: Evolución de la producción de acero de los diferentes métodos (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007)

Estos regeneradores fueron patentados por Friedrich Siemens en 1856, aunque la idea de aplicar este sistema a los hornos para la fabricación de acero fue de su hermano Wilhelm Siemens. Los regeneradores de calor consisten en dos apilados de ladrillos refractarios que funcionan alternativamente: mientras uno está almacenando calor de los humos de salida del horno, el otro está cediendo el calor al aire que lo atraviesa y que va al horno. Con este sistema es posible alcanzar temperaturas mucho más elevadas que las conseguidas hasta entonces. De 1.000-1.200° C se pasó a 1.650° C, temperatura suficiente para fundir hierro y acero.

Siemens realizó sus investigaciones en Inglaterra, mientras que Martin trabajaba en la misma época en París, ajeno a los descubrimientos del alemán en cuanto a la fabricación de acero. A pesar de ello, aplicó también sus regeneradores de calor a hornos de reverbero con este fin. Existían, sin embargo, diferencias en la idea metalúrgica del proceso. Mientras que Siemens pretendía obtener acero fundido oxidando la fundición con adiciones de mineral de hierro, Martin buscaba fabricar hierro y acero a partir de mezclas de chatarra y fundición. En este caso la oxidación se producía por la llama de la escoria y la chatarra oxidada. Posteriormente se emplearon



métodos mixtos, en los que la oxidación tenía lugar por la acción combinada del mineral, la llama oxidante y la escoria, en lo que se denominó proceso Martin-Siemens. El horno, por otra parte, recibió el nombre de su inventor: horno Siemens.

Una de las ventajas del proceso Martin-Siemens es que admite cargas metálicas de composiciones muy variadas. Una carga típica es de un 70% de chatarra y un 30% de fundición, aunque esta proporción se puede variar en función de la facilidad de cada fábrica en particular para adquirir uno u otro material.

Aunque para minerales muy puros se emplearon hornos Siemens con revestimiento ácido, la mayoría tenían revestimiento interior básico. En el proceso típico de un horno básico con carga 70/30, la fabricación del acero se puede considerar como una fusión y afino oxidante en horno de solera de mezclas de chatarra y fundición. La reducción del porcentaje en carbono se conseguía en este proceso por oxidación muy intensa del metal, al hacer circular los gases de combustión (ricos en oxígeno) por encima del baño metálico. En esta fase se producía un hervor intenso del baño que, al agitarlo, favorecía el contacto entre el metal y la escoria, facilitando y acelerando la transmisión de calor y la oxidación del metal. La escoria desempeñaba también un papel muy importante en el proceso de afino del baño metálico, actuando como portadora del oxígeno.

El oxígeno provenía de la chatarra oxidada, del mineral adicionado y del oxígeno del aire, gases o humos de la combustión. La caliza, al descomponerse, aportaba también CO_2 . A partir de 1950 fue cuando se empezó a inyectar oxígeno puro en lanzas que se introducían en el baño para acelerar su oxidación.

La fase de oxidación tiene dos partes: el hervor del mineral, casi inmediato tras su carga, y el hervor de la caliza, algo posterior al de mineral y que desprende CO_2 , que además oxida el carbono. Durante el proceso se oxidan también el silicio, manganeso y fósforo, que pasan a formar parte de la escoria. Aunque la eliminación del azufre no es fácil, tiene lugar en pequeña proporción gracias a que la escoria es muy calcárea y básica. Por último, cuando se ha disminuido el contenido en carbono lo necesario, se realiza el ajuste de la composición del acero, fundamentalmente en cuanto al porcentaje de manganeso y silicio. Se obtiene finalmente un acero de alta calidad.

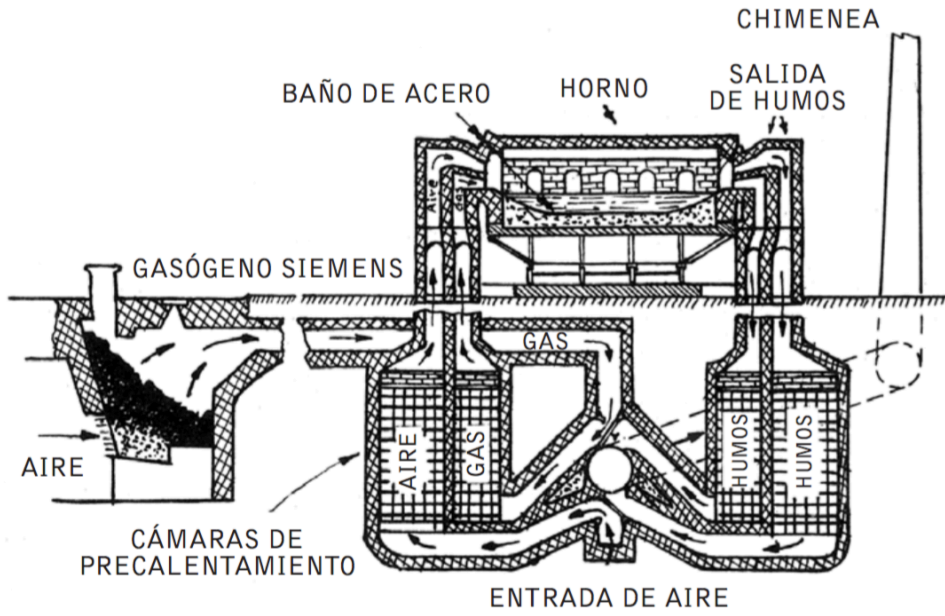


Fig. 10: Horno Siemens (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007)



4. El Proceso LD

El método más empleado actualmente para el afino o conversión del arrabio en acero es el proceso LD (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007). Este proceso fue ideado por Robert Durrer a mediados del siglo XX, desde su introducción desplazó rápidamente a los procesos Bessemer, Thomas y Siemens empleados hasta entonces y descritos en el **apartado 3.2**. La conversión tiene lugar en un convertidor de oxígeno básico o convertidor soplado por oxígeno.

Durrer fabricó acero siguiendo este procedimiento en 1948 y la primera colada de un convertidor experimental se realizó en 1949, en Linz (Austria). Por este razón, se denominó al proceso como LD (Linz-Durrer). Sin embargo, en la actualidad se interpretan generalmente estas siglas como las dos primeras ciudades que contaron con convertidores de estas características: Linz y Donawitz.

En el proceso LD, también conocido como proceso BOP (*Basic Oxygen Process*) el baño es impactado por un chorro de oxígeno puro a velocidad supersónica inyectado con una lanza vertical introducida por la boca del convertidor. Este convertidor se caracteriza por tener un revestimiento de carácter básico y estar cerrado por la parte inferior. El oxígeno reacciona con el carbono del arrabio, formando monóxido y dióxido de carbono. Produciéndose la decarburación del arrabio y obteniéndose acero. Durante el proceso se oxidan también otros elementos no deseados que pasan a la escoria.

Con este proceso se pueden lograr productividades superiores a las 600 t por hora y convertidor en servicio.

Esta tecnología presenta grandes ventajas frente a los métodos clásicos, gracias a las cuales fue capaz de desplazarlos rápidamente en la industria siderúrgica. Las más importantes (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007) son:

- El acero fabricado es de mejor calidad que el obtenido en los procesos anteriores.
- Permite emplear minerales con alto contenido en fósforo, debido a su revestimiento refractario de carácter básico.



- En el proceso LD la colada del acero es de corta duración, en torno a los 30 minutos, frente a las 5 ó 6 horas del proceso Martin-Siemens.
- Permite aprovechar material de las propias fábricas, ya sea defectuoso (despunte de colada continua, despunte de laminación, restos de cucharas y tundish) o hierro recuperado de la escoria del convertidor.

4.1. Instalaciones

La acería LD incluye las instalaciones necesarias para realizar el proceso de conversión, así como al de metalurgia secundaria y colada continua.

En el parque de chatarra se almacena y clasifica la chatarra que será cargada en el convertidor.

El sistema de almacenamiento, manipulación y transporte y las tolvas de pesaje de fundentes y ferroaleaciones se encuentran en la parte superior de la nave de convertidores, dónde también se sitúan los convertidores. Las cucharas de acero, el cono de escoria y los equipos para su reparación se encuentran en la nave de colada.

Tras realizar la colada del acero, se transporta en las cucharas a la nave de metalurgia secundaria y colada continua, generalmente anexa a la nave de colada. La escoria se lleva a la planta de tratamiento, donde se recupera el hierro presente y se obtiene escoria LD tras estabilizarla, con aplicaciones agrónomas, para la corrección del pH del suelo, en obras civiles, para carreteras, etc.

Sobre los convertidores se sitúa una campana que recoge y canaliza los gases de salida del convertidor, constituidos esencialmente por CO y CO₂ y con una temperatura aproximada de 1.700° C, cuenta también con polvo en suspensión. Los gases son enviados a las instalaciones de depuración, para la eliminación del polvo y aprovechamiento de calor. Posteriormente se almacenan en un gasómetro para su aprovechamiento.

El conjunto de las naves cuenta con puentes grúa para el transporte de las cucharas.

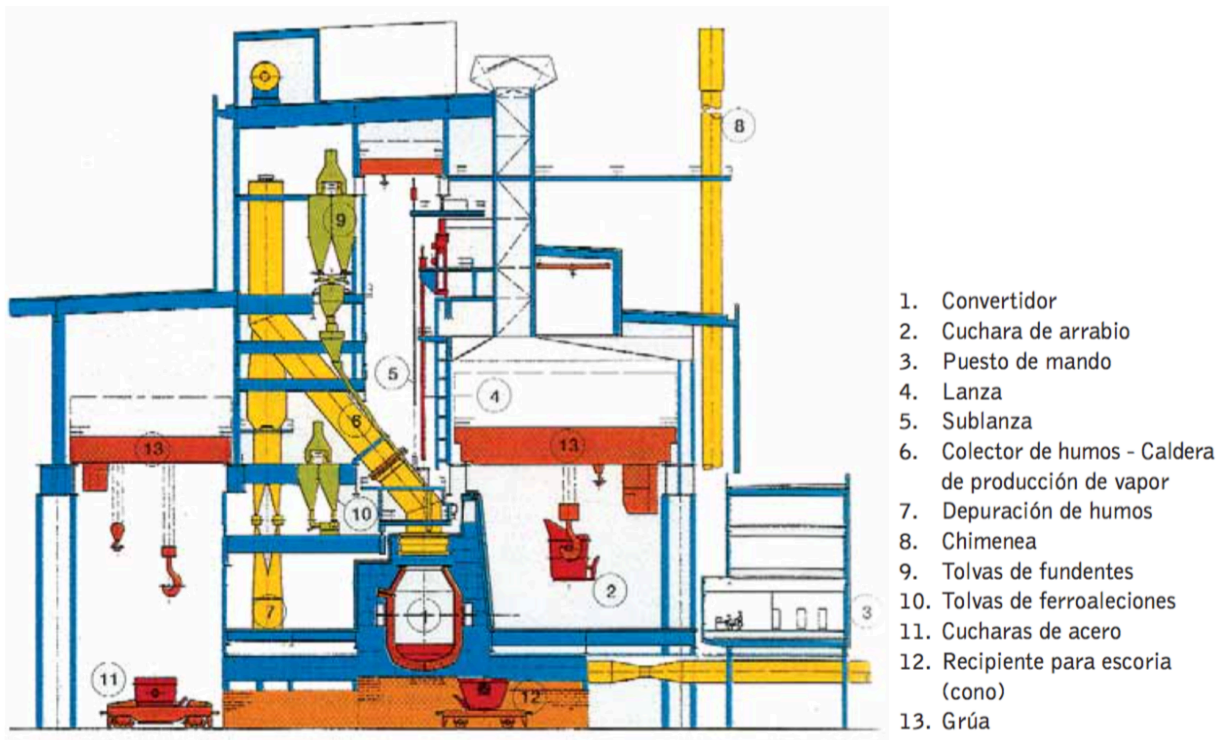


Fig. 11: Partes de la instalación de la acería LD (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007)

A continuación se describen los elementos más importantes empleados en el proceso de conversión.

4.1.1. Cuchara

La cuchara es un recipiente de grandes dimensiones, cuya pared es una coraza de acero recubierta interiormente de material refractario. Posee además dos salientes para su suspensión o apoyo y un asa abatible para el vuelco.

Según su función se distinguen dos tipos:

- Cuchara de arrabio: es la que recoge el arrabio de los torpedos y lo carga en el convertidor. Tiene una forma especial en la boca para facilitar su vertido en el convertidor y el desescoriado previo a la carga.
- Cuchara de acero: en este caso recoge el acero del convertidor y lo traslada a las instalaciones de metalurgia secundaria y colada continua. Esta cuchara tiene un agujero para la salida del acero en el fondo, donde se coloca un tubo de

refractario llamado buza de cuchara o tubo LSA (Ladle Shroud Argon) y el sistema de cierre de ésta (placas deslizantes).

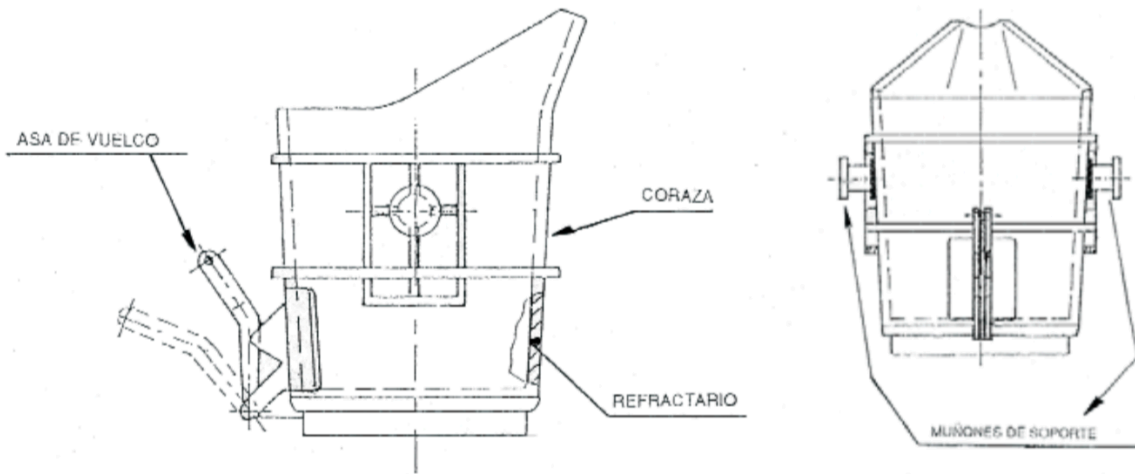


Fig. 12: Cuchara de arrabio (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007)

En el fondo, las cucharas cuentan con zonas de ladrillo poroso empotradas en el refractario, a través de las cuales se inyectan los gases inertes de homogeneización en la metalurgia secundaria y/o durante la sangría para favorecer los procesos metalúrgicos del acero.

4.1.2. Convertidor LD

El convertidor es un recipiente formado por una coraza de acero, revestida interiormente por material refractario de carácter básico de 250 a 800 mm de espesor.

La escoria del convertidor es de carácter básico (fundamentalmente compuesta por cal). Por este motivo se emplean materiales refractarios de carácter básico para el revestimiento interior. El proceso que se lleva a cabo en el convertidor es además muy oxidante, por lo que conviene que el refractario sea resistente a la oxidación. También se debe tener en cuenta que este material es el responsable de la mayor parte del peso total del convertidor, lo que pone de manifiesto de nuevo la importancia de una adecuada selección.



Se emplean generalmente ladrillos de magnesia de un 96-98% de pureza, con una porosidad entre el 10-12%. La porosidad del refractario debe ser lo más baja posible, para que no se produzcan filtraciones metálicas a la pared.

Para conseguir los contenidos deseados de magnesia se emplea dolomía (carbonato de calcio y magnesio: $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) enriquecida en magnesia. Este compuesto es más barato que la magnesia pura, aunque presenta el inconveniente de que se hidrata rápidamente al entrar en contacto con la atmósfera (especialmente en las paradas del convertidor), degradándose.

El espesor del revestimiento de refractario varía entre los 550 y los 800 mm, siendo mayor en la zona donde se produce el impacto de la chatarra durante el proceso de carga (cono inferior y fondo), para que el desgaste del revestimiento sea lo más uniforme posible. Es la llamada zona de impacto, situada en la pared del lado de carga del convertidor. Son también críticas la zona de desescoriado y la de muñones.

Originalmente se construían con un perfil en forma de pera, con su boca descentrada, similares a los Bessemer, con la intención de facilitar la extracción de la escoria y la instalación de la chimenea colectora de humos. Más tarde se comprobó que este desplazamiento axial no era necesario y se diseñaron con la boca de entrada centrada, facilitando así el movimiento de la lanza de oxígeno.

El convertidor LD actual consta de una parte troncocónica superior, una parte central cilíndrica y la parte inferior de nuevo troncocónica. El fondo es esférico.

En la parte superior se encuentra la boca de carga, por donde se realiza la carga de la chatarra, el arrabio, los fundentes y algunas de las ferroaleaciones, aunque la mayoría de éstas se echan a la cuchara durante la sangría.

En un lateral y hacia el tercio superior, en la unión del tronco de cono con la zona cilíndrica, está situada la boca de sangría. Esta boca está diseñada para colar el acero fundido y dejar pasar sólo una mínima cantidad de escoria que sirve para proteger el acero y evitar que se oxide una vez que está en la cuchara.

La colada del acero se realiza girando el convertidor. Con el propósito de facilitar esta operación y también la de carga, el convertidor va montado sobre unos soportes

giratorios denominados muñones situados a la mitad de su altura. El mecanismo de vuelco está accionado por varios motores.

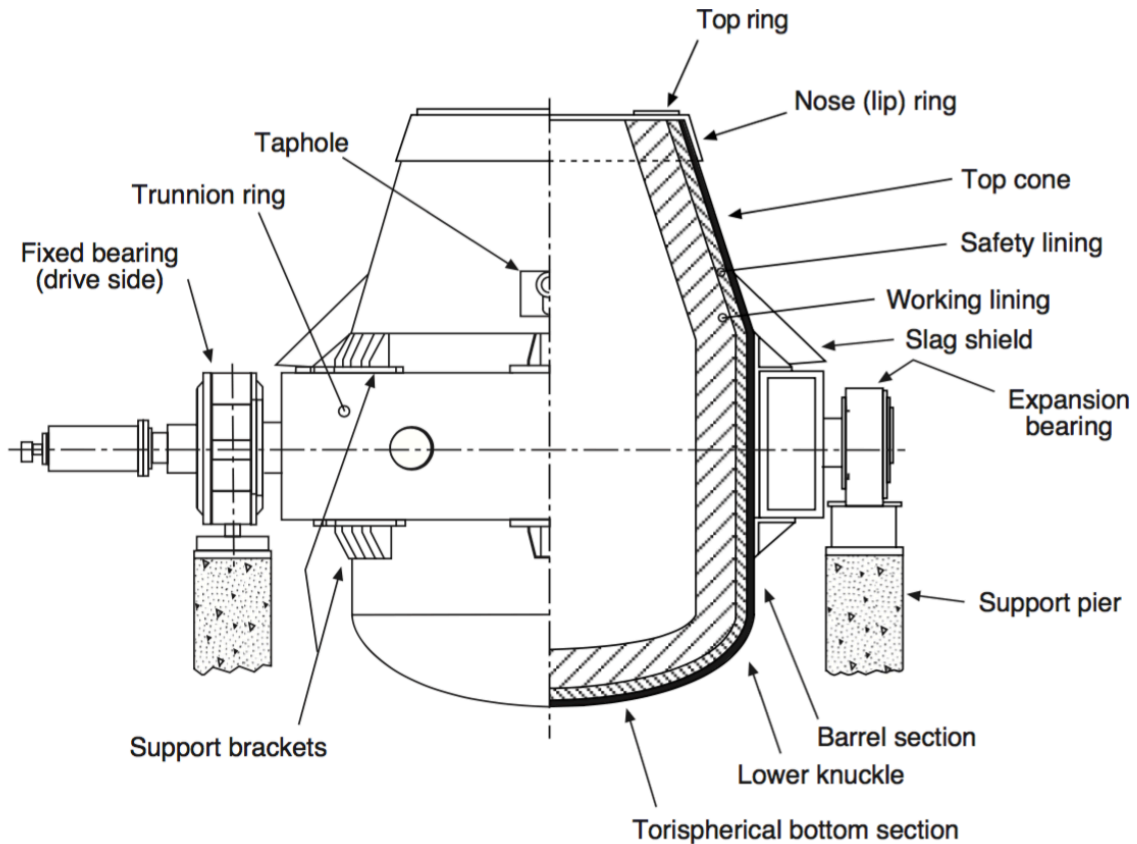


Fig. 13: Convertidor LD (United States Steel, 1998)

4.1.3. Lanza de inyección de oxígeno

Desde la invención del convertidor LD se han desarrollado otros métodos de fabricación de acero que se distinguen por el tipo de soplado de oxígeno: soplado por la parte superior o boca del convertidor, soplado por el fondo y soplado combinado.

En el proceso LD original la reducción del contenido de carbono del arrabio se realiza oxidando este carbono por medio de oxígeno puro que a través de una lanza se inyecta sobre el baño metálico a velocidades supersónicas.

La lanza es un tubo de doble hueco por el que circulan oxígeno para el soplado al convertidor y agua para la refrigeración propia. En la parte inferior se encuentra la cabeza de lanza, que dispone de un número variable de agujeros o toberas (entre cuatro y seis) para la salida del oxígeno.

La lanza va instalada en un carro que dispone de movimiento de traslación horizontal y vertical (mecanismo de elevación), con dos velocidades. Existe un dispositivo de seguridad que evita su caída al baño y que además permite su elevación rápida en caso de accidente.

Cada convertidor cuenta con dos lanzas con sus respectivos equipos. Generalmente una lanza está en operación y la otra en reserva para ser utilizada en caso de fallo en la primera, aunque en algunas acerías las dos lanzas se emplean alternativamente. El cambio de lanza es una operación rápida que se puede realizar en aproximadamente cinco minutos.

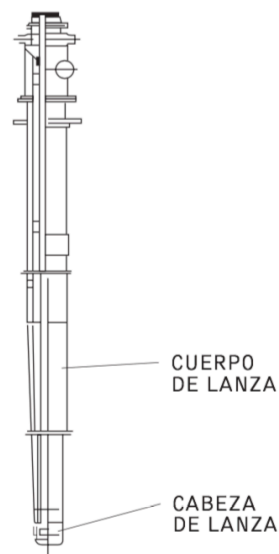


Fig. 14: Lanza de inyección de oxígeno (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007)

4.1.4. Sublanza

El modelo de control dinámico de los convertidores que se utiliza en la actualidad para mejorar la productividad, la calidad y el coste del acero, se lleva a cabo con la ayuda de una sonda o sublanza.

Esta sublanza se introduce en el baño en el momento adecuado del proceso (el convertidor en posición vertical) y permite conocer la temperatura y el contenido en carbono del acero, extrayendo una muestra para realizar un análisis químico inmediato. Esto se puede realizar durante o después del soplado. También es posible emplear la



sublanza para medir el nivel del baño, operación que se realizaría antes de iniciar el soplado.

Este sistema de toma de muestras y temperatura presenta la ventaja de poder actuar durante la conversión sin necesidad de detener el proceso como se hacía antes de disponer de este equipo, optimizando así la producción y los costes. Además, su rapidez de respuesta permite variar el proceso previsto y conseguir el punto final deseado (control dinámico), mejorando la calidad del producto.

La sublanza, como la lanza de inyección de oxígeno, está refrigerada interiormente con agua. Se acciona con un cabrestante y se introduce en el convertidor a través de un agujero existente en la caldera móvil (lo que se llama “domo de la sublanza”).

4.2. Materiales

Se incluyen en este apartado los materiales principales empleados en el convertidor LD: arrabio, refrigerantes (principalmente chatarra y mineral de hierro), fundentes y oxígeno.

4.2.1. Arrabio

Es la materia prima principal del proceso, es fuente de hierro y de energía, debido a su alta temperatura. Contiene, además de hierro, un 4-4,5% de carbono, 0,3-1,5% de silicio, 0,25-2,2% de manganeso, 0,04-0,20% de fósforo y 0,03-0,08% de azufre (United States Steel, 1998). La composición varía según las cargas empleadas en horno alto y la marcha del horno.

La composición química del arrabio debe encontrarse dentro de unos límites para que el proceso de conversión y la composición final del acero sean adecuados. El silicio se oxida de forma muy exotérmica, tiene una gran influencia sobre la temperatura del baño, e incide sobre el volumen de escoria. El manganeso influye en la eliminación del azufre y el fósforo y en la formación de escoria. La desulfuración debe realizarse antes



de llegar al convertidor, ya que el ambiente oxidante no la favorece. El contenido en fósforo debe controlarse dada la complejidad de su eliminación.

También se puede emplear arrabio sólido procedente de la limpieza de los torpedos o de los excedentes de producción de horno alto. La cantidad de arrabio sólido es función de la temperatura del arrabio, la composición, las existencias y, en algunos casos, del grado de acero a fabricar. El consumo medio puede estar alrededor de los 40 kg de arrabio sólido por tonelada de arrabio líquido.

La temperatura media del arrabio cargado en el convertidor es de unos 1.330^o C y se emplean de 865 a 950 kg de arrabio líquido por cada tonelada de acero producida.

4.2.2. Chatarra

La chatarra actúa como refrigerante, se emplea para mantener la temperatura de colada dentro de los límites admisibles absorbiendo el calor producido en las reacciones de oxidación. El consumo de chatarra depende de la temperatura y composición del arrabio y temperatura final de colada, principalmente. La chatarra representa un 10-30% de la carga metálica, siendo 150 kg/tonelada de acero un valor comúnmente empleado.

Es acero de piezas que han terminado su vida útil. Puede tener diversas procedencias, aunque se distinguen dos clases: chatarra procedente de despuntes, recortes, slabs, chapas y bobinas defectuosas y la procedente de compras de exterior, de inferior calidad debido a la diversidad de composición.

Debe estar libre de elementos como plásticos, grasas, pinturas y metales pesados, que son difíciles de extraer en las operaciones de afino y no puede contener elementos perjudiciales para el acero. Algunos elementos, como el cobre y el níquel, no se oxidan en el convertidor, y otros como el cromo, aunque se oxidan algo, tampoco desaparecen.

También debe cumplir requisitos en cuanto al tamaño, si se cargan trozos muy grandes dañan el refractario del convertidor en la caída, necesitan mucho tiempo para fundirse.



4.2.3. Mineral

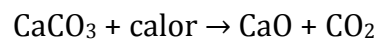
Se emplea también mineral de hierro como refrigerante y aporte de hierro. El mineral debe cumplir ciertos requisitos de composición, su contenido en azufre y fósforo debe ser bajo. Si es necesario favorecer la desulfuración se utiliza mineral con alto contenido en manganeso.

4.2.4. Fundentes

Los fundentes actúan como escorificantes y fluidificantes de la escoria. Atrapan las sustancias no deseadas, que se recogen en la escoria de convertidor, y rebajan el punto de fusión de la escoria, consiguiendo que la fluidez sea suficiente para permitir que tengan lugar las reacciones químicas y la penetración del chorro de oxígeno. Es un conjunto de óxidos que, por su menor densidad, flotan sobre el acero. Como fundentes se emplean generalmente caliza, cal, dolomía y espato flúor.

Caliza

La caliza es carbonato cálcico (CaCO_3). Se emplea como refrigerante y para la obtención de cal mediante calcinación:



Cal

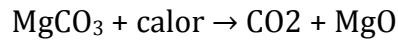
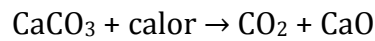
Este material es de carácter básico, facilita la captación de impurezas por la escoria y protege el refractario. El consumo medio es de unos 40-45 kg de cal por cada tonelada de acero.

La cal debe estar totalmente calcinada, para evitar que la cantidad de cal sea menor de la esperada y el efecto refrigerante al ser calcinada. El contenido en azufre, SiO_2 , Al_2O_3 y MgO debe ser bajo para no contaminar el acero. El tamaño de material no debe ser demasiado fino, pueden ser absorbidos por la campana, ni gruesos, tardan demasiado en fundirse.



Dolomía

Es un carbonato de calcio y magnesio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Al ser calcinado se descompone en caliza y carbonato magnésico que, a su vez, se descomponen dando cal y magnesia



Se usa para proteger el refractario de los ataques de la escoria, aportando MgO, y como refrigerante.

Espato flúor

Es el fluoruro cálcico (F_2Ca), se conoce simplemente como espato. Fluidifica la escoria, aumentando la capacidad de reacción de la misma. Se debe emplear de forma controlada, puesto que deteriora el refractario del convertidor.

Hoy día se ha reducido mucho su uso, a causa de su ataque sobre el refractario y restricciones legales. Se está sustituyendo con éxito por escoria de convertidor recuperada.

4.2.5. Oxígeno

Es el agente oxidante para las reacciones que tienen lugar en el convertidor. Su pureza debe ser superior al 99,99%, de lo contrario la disolución de nitrógeno en el baño superaría las restricciones. Se inyecta a velocidad supersónica por la boca del convertidor a través de una lanza, para asegurar el contacto y la agitación del baño. También se aporta oxígeno como del mineral de hierro.

El consumo de oxígeno en el proceso LD oscila entre 50 y 60 Nm^3 por tonelada de acero.



4.3. Secuencia de operaciones

A continuación se describen las diversas operaciones que se realizan durante el proceso de conversión.

4.3.1. Cálculo de la carga

Antes de cargar el convertidor, se realiza un cálculo por ordenador para determinar la carga a emplear, en función de los requisitos de composición y temperatura requeridos en el acero. Se analiza la composición química del arrabio en el laboratorio y se mide su temperatura para añadirlo a los cálculos, el proceso lleva entre 3 y 10 minutos. También se tiene en cuenta la composición de la chatarra y los fundentes empleados. En el **apartado 6**, se introducen los cálculos que deben realizarse.

4.3.2. Carga del convertidor

Para la carga, se inclina el convertidor 30-45° para realizar la carga de la chatarra, que representa un 10-30% del total. Tras finalizar la carga, se endereza el convertidor para repartir homogéneamente el material por el fondo.

El arrabio llega a la acería en vagones torpedo procedente del horno alto, la desulfuración generalmente tiene lugar en el propio torpedo durante el trayecto. Se vierte el arrabio a la cuchara de carga y se elimina la escoria formada durante el transporte y la desulfuración, para ello se vuelca parcialmente la cuchara de arrabio y se arrastra la escoria hacia la boca de la cuchara, dejándola caer sobre el cono de escoria.

Tras el desecoriado, se inclina el convertidor de nuevo y se vierte el arrabio, el proceso lleva entre 1 y 5 minutos. La temperatura del arrabio durante el vertido es de unos 1.330° C. Una vez completada la carga el convertidor vuelve a su posición inicial.

Un procedimiento alternativo es cargar en primer lugar el arrabio y después la chatarra, con el inconveniente de que pueden producirse salpicaduras.

Los fundentes se añaden una vez iniciado el soplado.



Previamente al soplado de oxígeno, se cierran una puertas correderas para aislar el convertidor del resto de la acería y que la captación seca de los humos sea eficaz y proteger los equipos del calor de la conversión, así como de posibles salpicaduras.

4.3.3. Soplado de oxígeno

Una vez completada la etapa de carga y aislado el convertidor se desciende la lanza hasta la posición de soplado, unos 90-300 cm por encima del nivel del baño, y comienza la inyección de oxígeno. La presión de inyección es de unas 10 atm, debe ser suficiente para que la penetración del chorro de oxígeno en el arrabio sea adecuada y sea capaz de atravesar la capa de escoria que desde el comienzo de la operación se forma sobre el baño metálico

El impacto del chorro de oxígeno sobre el baño provoca una depresión, con una zona de circulación de fluido alrededor. Se producen adicionalmente salpicaduras y comienzan a elevarse gases. En algunas zonas la agitación del baño es escasa o nula, zonas muertas, por lo que el oxígeno no reacciona con los elementos del baño o lo hace muy lentamente. Para evitar estas zonas muertas y favorecer un mejor contacto entre el oxígeno y el baño se han desarrollado numerosas variaciones al convertidor LD, una de ellas es el soplado de fondo LBE que será descrito en el **apartado 4.5**.

Otra forma de evitar las zonas muertas, sin variar el diseño del proceso, consiste en optimizar la relación entre el diámetro del convertidor y el diámetro de la superficie de impacto del chorro de oxígeno y la relación entre la profundidad de la depresión producida en el baño con la profundidad del baño. La primera relación está determinada por el diseño del convertidor y la cabeza de la lanza y no puede ser modificada. La profundidad de la depresión sí puede ser variada modificando la altura de soplado y el caudal.

La posición de la lanza es muy importante para el buen funcionamiento del proceso. Si es demasiado elevada, la escoria será agitada y oxidada en exceso, con un porcentaje mayor de FeO, lo que implica mayores pérdidas de rendimiento y menor eficiencia de las aleaciones. El volumen de escoria aumenta y puede derramarse por la boca del convertidor. Además, la velocidad de eliminación de carbono se reduce y se vuelve irregular. Cuando la lanza es demasiado baja, aumenta la eliminación del



carbono, a costa de una reducción en la formación de escoria, su reactividad y el porcentaje de FeO y con frecuencia se producen problemas en la eliminación de azufre y fósforo. También se producen proyecciones de gotas de metal que pueden producir daños en el refractario, la lanza y la campana de gas.

El proceso de conversión dura entre 15 y 25 minutos. Antes de terminar la conversión se toma una muestra del baño, que es analizada en laboratorio, empleando la sublanza para realizar correcciones en caso de que sean necesarias.

4.3.4. Colada del acero

Cuando la composición y la temperatura del acero en el convertidor cumplen las exigencias, se realiza la colada o sangría.

En primer lugar, se vierte el metal a la cuchara de colada. Para ello se gira el convertidor y se vierte el acero a través de la piquera de sangría. Durante la colada se adicionan las ferroaleaciones, para realizar el ajuste final de composición en la metalurgia secundaria. Para evitar la salida de escoria durante este proceso se cuenta con dos sistemas de vigilancia y control. El primero consiste en controlar el porcentaje de escoria que hay en el chorro de sangría con una cámara. En segundo consiste en emplear cono de refractario de densidad intermedia a las del acero y la escoria, este cono se introduce en el convertidor durante la sangría y tapa la piquera evitando que salga la escoria. Incluso empleando estas medidas pasa una pequeña parte de la escoria, que evita que el acero de la cuchara se oxide en contacto con el aire.

Tras la colada del acero, se vacía la escoria por el lado opuesto de la boca al cono de escorias. El cono de escorias se envía, tras enfriar, a la planta de tratamiento dónde se recupera el hierro presente.



4.4. Etapas en la conversión

Durante el soplado de oxígeno se distinguen tres etapas de reacción con mecanismos muy diferentes, éstas son: oxidación del silicio, decarburación total y difusión del carbono.

4.4.1. Periodo de oxidación del silicio

Tiene lugar durante el primer tercio del soplado. La mayor parte del Si, el metal más activo, se oxida en una reacción muy exotérmica junto con algo de Fe. En esta fase se añaden los fundentes, en el comienzo del soplado se añade la mitad de la cal y unos 4 minutos después el resto.

Una buena práctica durante esta fase consiste en aumentar el contenido de FeO y obtener una buena escoria espumante al comienzo del soplado, para posteriormente estabilizarla bajando la lanza.

Durante este período también tiene lugar la oxidación de la mayor parte del P y del Mn. El oxígeno restante reacciona con parte del carbono. En esta fase la llama es corta y poco luminosa y el proceso es muy exotérmico.

4.4.2. Periodo de decarburación creciente

En esta etapa tiene lugar en primer lugar la oxidación del manganeso, seguido del carbono y el fósforo. La llama alcanza su máxima luminosidad y longitud, para disminuir después hasta el final.

4.4.3. Periodo de decarburación decreciente y oxidación del metal

Al finalizar el soplado, cuando el contenido de carbono es menor al 0.8%C, la velocidad de decarburación disminuye sustancialmente y se encuentra cada vez más limitada por la difusión del carbono en el acero. Esta etapa es clave en la fabricación de aceros inoxidables, con bajos contenidos en carbono. El bajo porcentaje de carbono causa la oxidación del hierro, indicando el final del proceso.

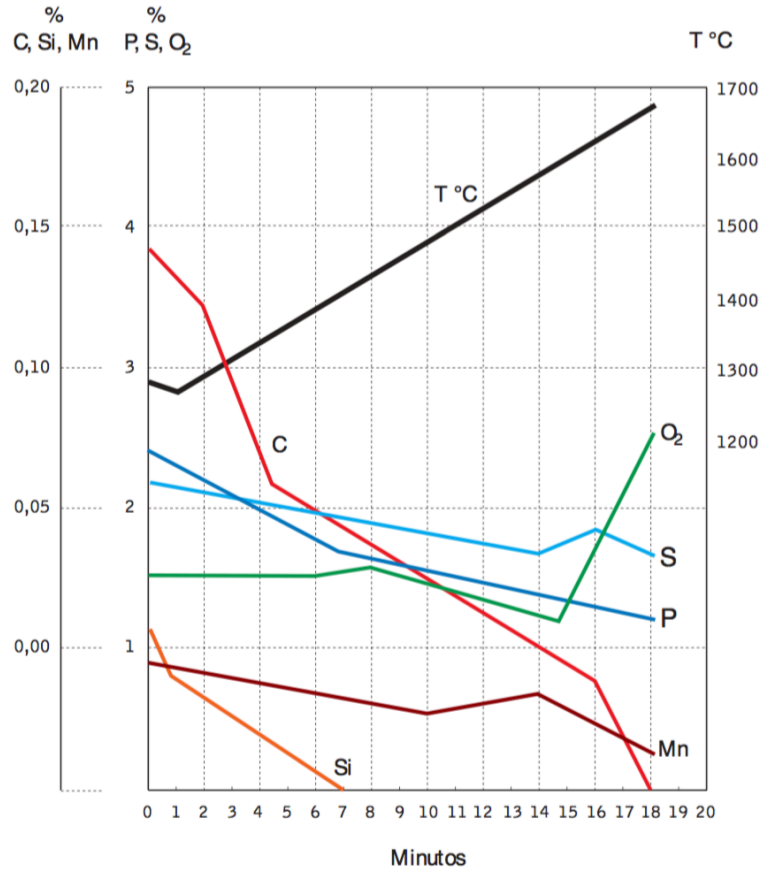


Fig. 15: Evolución de la composición y la temperatura del acero durante la conversión (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007)

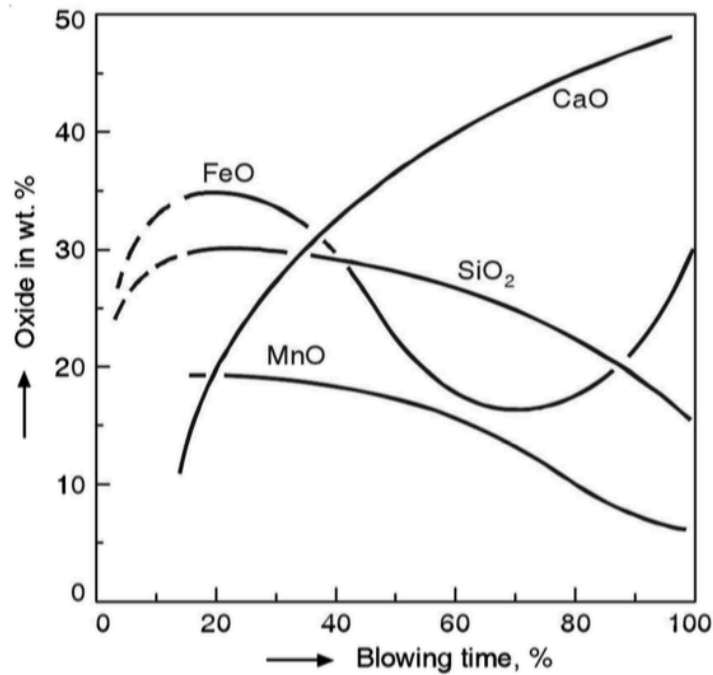


Fig. 16: Evolución de la composición de la escoria durante la conversión (Ahindra Ghosh, 2008)



4.5. Sistema LBE

El sistema LBE (“Lanza-Burbujeo-Equilibrio”) es una variante del convertidor LD desarrollada para evitar las zonas muertas, mejorando la agitación del baño y produciendo corrientes que favorecen las reacciones de conversión mediante la inyección de un gas inerte por el fondo del convertidor durante y después del afino.

Las principales ventajas que presenta el sistema LBE frente al proceso LD son:

- Menor contenido de FeO en la escoria para acero de igual contenido en C, aumentando así el rendimiento metálico y la duración del refractario. La mejora en la agitación consigue que la escoria se encuentra más próxima al equilibrio, reduciéndose la concentración de FeO
- Reducción en el consumo de cal para el mismo contenido de P y S en el acero o menor contenido de P y S para el mismo consumo de cal.
- Menor consumo de fundentes.
- Menor contenido de O₂ en el acero, obteniéndose mayor limpieza en el mismo y un menor consumo de Al en la cuchara para el calmado del acero.
- Posibilidad de obtención de aceros bajos en C.
- Enfriamiento más rápido cuando se tiene una temperatura de fin de soplado demasiado alta.
- Disminución de proyecciones.
- Mayor contenido de Mn, reducción de la adición de este elemento.

El gas inerte puede ser nitrógeno o argón. La elección se realiza según criterios metalúrgicos y económicos. Dado que el N₂ es mucho más barato, se empleará siempre que el criterio metalúrgico lo permita. Puesto que el contenido en nitrógeno de un acero es perjudicial por encima de ciertos límites, se utiliza Ar si se estima que el N que se pueda disolver durante el soplado más el presente en el baño pueda sobrepasarlos.

El soplado de gas inerte se divide en tres partes: periodo inicial, periodo final y soplado metalúrgico.



4.5.1. Periodo inicial

Comprende desde el comienzo del soplado con oxígeno hasta unos 2 minutos antes de finalizar.

Durante la ignición, hasta que se consigue la inflamación del O_2 , el soplado debe homogeneizar y acelerar el encendido del baño, mejorando el rendimiento del oxígeno inyectado.

Tras la inflamación, comienza la desiliciación. La escoria formada es muy viscosa, al ser rica en SiO_2 , lo que dificulta la salida de gases. Se reduce el volumen de O_2 y gas inerte inyectado para evitar problemas.

Durante la decarburación, se incrementa el caudal de soplado del gas inerte. La inyección aumenta la presión del gas, lo que favorece la reacción de oxidación del C y el poder ascensional del CO.

4.5.2. Periodo final

Al final de la inyección de oxígeno se produce la mayor oxidación del hierro, con la agitación con gas inerte se acelera la oxidación del C y se reduce la pérdida de hierro con la escoria.

4.5.3. Soplado metalúrgico

Tras finalizar el soplado de oxígeno, se realiza un soplado metalúrgico de gases inertes con un caudal elevado. Se consigue mejorar la decarburación y la defosforación, homogeneizar la composición y la temperatura, refrigerar y reducir la oxidación del baño.

En esta fase se puede inyectar N_2 , puesto que al no haber soplado con oxígeno no disuelve en el baño.

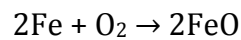


5. Reacciones en el convertidor

Se incluyen a continuación las reacciones que tienen lugar durante el proceso de conversión en las diferentes etapas: oxidación del hierro y eliminación del Silicio, manganeso, carbono, fósforo y azufre. Los procesos críticos en el convertidor son la decarburación y la defosforación. El grado de decarburación marca el tiempo de proceso y las pérdidas de Fe, en forma de FeO en la escoria. La defosforación solamente puede tener lugar en el convertidor, el contenido de P en la colada del convertidor ya no podrá ser eliminado y forma parte del acero final. Mientras que la desulfuración se realiza principalmente en la cuchara previamente a la conversión, la eliminación del silicio se realiza con facilidad en la primer tercio del proceso y el manganeso no es problemático, sino que suele adicionarse posteriormente en la cuchara.

5.1. Oxidación del hierro

El oxígeno inyectado reacciona con el hierro y forma óxido de hierro (FeO), que es inestable en el ambiente químico del baño y es el proveedor de oxígeno para la oxidación de los demás elementos.



5.2. Eliminación del silicio

El Si es el primer elemento en reaccionar con el oxígeno proporcionado por el FeO en una reacción muy exotérmica, dando lugar a sílice (SiO₂):

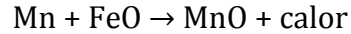


La sílice formada se combina con los óxidos básicos presentes en el baño (óxido de manganeso, de hierro y óxido cálcico), dando lugar a la escoria que flota sobre el baño.



5.3. Eliminación del manganeso

El manganeso forma óxido de manganeso reaccionando con el oxígeno de FeO, el óxido formado se combina con la sílice y pasa a la escoria.

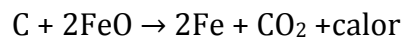
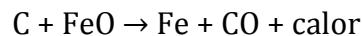


Durante la etapa decarburación máxima y a elevadas temperaturas, el carbono reduce parte del Mn de la escoria, con lo que que aumenta su actividad y vuelve al baño, lo cual permite reducir las ferroaleaciones.

5.4. Eliminación del carbono

El carbono se elimina con los gases como CO y CO₂ que se eliminan por la campana extractora. La relación CO₂/(CO+CO₂) se conoce como Relación de Combustión Secundaria (PCR).

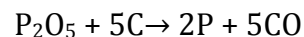
Las reacciones en el convertidor son:



La velocidad de decarburación es mayor según disminuye la altura de la lanza y aumenta el caudal o la presión del oxígeno.

5.5. Eliminación del fósforo

El fósforo reacciona con el oxígeno para formar pentaóxido de fósforo (P₂O₅), pero este compuesto no es estable a las temperaturas del proceso y sería reducido por el carbono, volviendo al baño, según la siguiente ecuación.

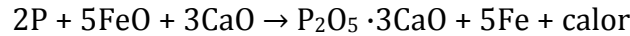


La eliminación del fósforo solamente sería posible tras conseguir una decarburación total, lo cual implicaría grandes pérdidas de Fe y un tiempo y costes de proceso muy elevados.



Para evitarlo se añade cal (CaO), que fija el pentaóxido de fósforo en forma de fosfato de cal ($P_2O_5 \cdot 3 CaO$), el cual pasa a la escoria.

La reacción completa para la eliminación del P es la siguiente:

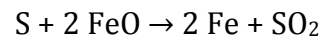


Se trata de una reacción reversible y muy exotérmica que requiere de un medio favorable, donde abunden el FeO y el CaO (escoria básica) y la temperatura no sea muy elevada.

5.6. Eliminación del azufre

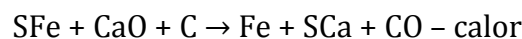
Para la eliminación del azufre existen dos vías:

- Por los humos: de esta manera se elimina entre un 10 y un 15% de la cantidad total eliminada.



- Por la escoria: En forma de sulfuro de calcio (SCa) o sulfuro de manganeso (SMn).

Partiendo de sulfuro de hierro, en presencia de abundante cal y espato flúor (da fluidez a la escoria) se forma SCa:



Es una reacción endotérmica, por lo que se ve favorecida por las altas temperaturas. En lugar del carbono también puede intervenir el silicio. En ambos casos, la reacción debe tener lugar al principio del proceso cuando estos elementos son abundantes o el sentido de la reacción podría invertirse. El volumen de escoria debe ser elevado, ya que la solubilidad del SCa es limitada.

La eliminación del azufre también se produce en forma de SFe por el manganeso, puro u oxidado (MnS),



Esta reacción se ve favorecida por la abundancia de Mn y las altas temperaturas. El sulfuro de manganeso (MnS) es más soluble en la escoria que el SFe.



Por tanto, la eliminación del azufre se ve favorecida decarburando hasta contenidos muy bajos en C, aumentando la basicidad, elevando la temperatura de colada, con contenidos altos de Mn, elevando el volumen de escoria y con una buena agitación del baño.

De todas formas la desulfuración no es un proceso crítico en el convertidor, sino que ésta tiene lugar principalmente en el torpedo. Por esta razón se desecora la cuchara de arrabio antes de cargar el convertidor.

Debe tenerse en cuenta que el azufre se encuentra presente, además de en el arrabio, en los fundentes, la chatarra y el sinter. Por tanto el contenido de azufre en la colada puede ser mayor que en el arrabio inicial



6. Balances de masa y energía

Los productos de reacción entre el metal caliente y el oxígeno ingresan ya sea en la fase escoria (Fe, Si, Mn, P, Cr etc.) o en la fase gaseosa (C como CO y CO₂). La distribución de elementos entre el metal líquido, la escoria y el gas depende de la cantidad de oxígeno soplado y de las condiciones de contacto entre el metal caliente y el oxígeno. Las condiciones de soplado influirán en:

- Composición del gas; relación de combustión secundaria $PCR = CO_2 / (CO + CO_2)$ donde CO y CO₂ son fracciones volumétricas.
- Grado de oxidación del Fe en la escoria $Fe^{3+} / (Fe^{2+} + Fe^{3+})$. En el soplado por arriba, esta relación es de aproximadamente 0,3 que corresponde a una relación de masa $O_{ligado} \text{ al } Fe / Fe_{oxidado} = 0,33$.

Además, es necesario imponer una restricción a la cantidad de Fe oxidado, usualmente a través de un valor fijo del contenido de hierro en la escoria. Para los aceros inoxidable, se considera la oxidación del Cr, normalmente fijada a través del rendimiento de la decarburación por oxígeno.

En este sistema simplificado, es claro que para un acero de composición determinada, una vez establecidos los tres parámetros tratados (composición del gas, grado de oxidación y cantidad de Fe oxidado), 4 ecuaciones son necesarias a fin de evaluar las cantidades de oxígeno, acero líquido, escoria y gas que corresponden al tratamiento de una cantidad determinada de metal caliente (o para producir una cantidad determinada de acero). Estas ecuaciones son los balances de Fe, O, gas y elementos de escoria, excepto Fe (Si, Mn y P). Se puede mostrar fácilmente que estas ecuaciones son independientes.

Cualquier restricción adicional requerirá de una variable de entrada adicional (o de la exclusión de una de las restricciones previas). Este es el caso de condiciones industriales típicas:

- La temperatura del acero es fija. Esta restricción requiere de la carga de un agente endotérmico (chatarra, mineral, etc.) o exotérmico (ferro-silicio, carbón, etc).



- El agregado de cal apagada para obtener las propiedades de escoria deseadas. Esta restricción puede expresarse como una imposición adicional sobre la composición de la escoria (contenido de CaO, o índice de basicidad CaO/SiO_2 o $(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{SiO}_2+\text{P}_2\text{O}_5)$, o imposición de una ecuación de índice de cal apagada.
- Fijación del contenido de MgO en la escoria para protección de los refractarios. Un aporte independiente de MgO es necesario, por ejemplo como cal dolomítica.

En la siguiente tabla se introducen los materiales de entrada y salida del proceso de conversión y la información de que se dispone para cada uno.

Tabla 1: Entradas y salidas de material en el convertidor

Entradas	Arrabio	Peso desconocido, composición y temperatura fijos
	Chatarra	Peso desconocido, composición y temperatura fijos
	Mineral	Peso composición y temperatura fijos
	Cal calcinada	Peso desconocido, composición y temperatura fijos
	Dolomía	Peso desconocido, composición y temperatura fijos
	Oxígeno	Peso desconocido, composición y temperatura fijos
	Argón	Peso, composición y temperatura fijos
Salidas	Acero	Peso, composición y temperatura fijos
	Escoria	Peso desconocido, temperatura, basicidad , %MgO y %FeO fijos
	Gas	Peso desconocido, temperatura media y PCR fijos

Por lo tanto, una carga típica posee 7 pesos desconocidos y requiere 7 ecuaciones de equilibrio:



- Balance de hierro
- Balance de Oxígeno
- Balance de Gas
- Balance de elementos de escoria, excepto hierro
- Índice de basicidad
- Balance de magnesia
- Balance de energía

6.1. Balance de masa

En un reactor discontinuo secuencial, es decir, donde se vacía el recipiente entre coladas, el balance de masa compara la entrada y salida de materiales sobre la base de sus pesos medidos y análisis. La diferencia entre ambos términos, si existiese alguna, puede atribuirse a las incertidumbres sobre estos parámetros, o bien a una pobre identificación de algunas de estas entradas (desgaste del refractario, arrastre de escoria, etc.) o salidas (humos, polvos, etc.):

$$\sum \text{entrada} = \sum \text{salida} (+\text{pérdidas})$$

Se pueden considerar:

- balances totales
- balances de ciertos elementos (gas, escoria, etc.)
- balance elementales (Fe, O₂, CaO, etc.)

Por ejemplo, el balance del elemento X se define:

$$\frac{1}{100} \sum_i Q_{E_i} (\%X_{E_i}) = \frac{1}{100} \sum_j Q_{S_j} (\%X_{S_j}) (+\text{Pérdidas})$$

Dependiendo del contexto, esta ecuación puede usarse para:

- estimar los términos de pérdida
- evaluar la cantidad de Q_{E_i} o Q_{S_j} de una entrada o salida
- evaluar la composición $\%X_{E_i}$ o $\%X_{S_j}$ de una entrada o salida



Establecer balances de masa precisos es siempre el primer paso importante para garantizar la validez del balance de energía.

6.1.1. Balance de hierro

$$\left[\%Fe_{Arrabio} P_{Arrabio} + \%Fe_{Chatarra} P_{Chatarra} + \%Fe_{Mineral} P_{Mineral} \right] = \left[\%Fe_{Acero} P_{Acero} + \%Fe_{Escoria} P_{Escoria} \right]$$

6.1.2. Balance de Oxígeno

Las cantidades de oxígeno usadas para la oxidación de los diversos elementos, C, Mn, P, Si son calculadas sobre la base de las cantidades de estos elementos oxidados, Q_C , Q_{Mn} , Q_P y Q_{Si} .

$$Q_C = 0.01 \left[\%C_{Arrabio} P_{Arrabio} + \%C_{Chatarra} P_{Chatarra} + \%C_{Mineral} P_{Mineral} - \%C_{Acero} P_{Acero} \right]$$

$$Q_{Mn} = 0.01 \left[\%Mn_{Arrabio} P_{Arrabio} + \%Mn_{Chatarra} P_{Chatarra} + \%Mn_{Mineral} P_{Mineral} - \%Mn_{Acero} P_{Acero} \right]$$

$$Q_P = 0.01 \left[\%P_{Arrabio} P_{Arrabio} + \%P_{Chatarra} P_{Chatarra} + \%P_{Mineral} P_{Mineral} - \%P_{Acero} P_{Acero} \right]$$

$$Q_{Si} = 0.01 \left[\%Si_{Arrabio} P_{Arrabio} + \%Si_{Chatarra} P_{Chatarra} + \%Si_{Mineral} P_{Mineral} - \%Si_{Acero} P_{Acero} \right]$$

Teniendo en cuenta la cantidad de oxígeno usado para oxidar el Fe, calculado a partir de la composición de la escoria, y la cantidad de oxígeno disuelto en el acero, el balance de oxígeno es:

$$P_O + 0.01 \left(\%O_{Mineral} P_{Mineral} \right) = \left[\frac{16}{12} (1 - PCR) + \frac{32}{12} PCR \right] Q_C + \frac{16}{55} Q_{Mn} + \frac{80}{62} Q_P + \frac{32}{28} Q_{Si} + 0.01 \left(\%O_{Fe} \right)_{Escoria} P_{Escoria} + 0.01 \%O_{Acero} P_{Acero}$$

6.1.3. Balance de gas

$$P_G = \left[\frac{28}{12} (1 - PCR) + \frac{44}{12} PCR \right] Q_C + P_{Argón}$$



6.1.4. Balance de elementos de escoria, excepto hierro

$$\frac{71}{55}Q_{Mn} + \frac{142}{62}Q_P + \frac{60}{28}Q_{Si} + 0.01\%(CaO)_{Cal} P_{Cal} + 0.01\%(CaO)_{Dolomia} P_{Dolomia} + \\ + \% (MgO)_{Cal} P_{Cal} + \% (MgO)_{Dolomia} P_{Dolomia} = 0.01 \left[100 - \% Fe_{Escoria} - (\% O_{Fe})_{Escoria} \right] P_{Escoria}$$

6.1.5. Índice de basicidad

$$0.01(\%CaO)_{Cal} P_{Cal} + 0.01(\%CaO)_{Dolomia} P_{Dolomia} = v \frac{60}{28} Q_{Si}$$

6.1.6. Balance de magnesia

$$0.01(\%MgO)_{Cal} P_{Cal} + 0.01(\%MgO)_{Dolomia} P_{Dolomia} = 0.01(\%MgO)_{Escoria} P_{Escoria}$$

6.2. Balance térmico

6.2.1. Funciones termodinámicas y unidades

La función termodinámica que mide los intercambios de calor es la entalpía H. Para un determinado material, el cambio de entalpía en función de la temperatura, en ausencia de una transformación de fase, se expresa a partir de la capacidad térmica CP:

$$H_{T_2} - H_{T_1} = \int_{T_1}^{T_2} C_p \cdot dT$$

La unidad SI de entalpía es el Joule (J). Otras unidades prácticas son:

6.2.2. Principios para el establecimiento del balance térmico

Un método práctico para expresar el balance térmico consiste en reunir las transformaciones individualmente para cada elemento químico relevante y sumarlas al final. Para este cálculo, se utiliza el segundo principio de la primera ley de termodinámica: “el calor de reacción depende sólo de los estados iniciales y finales y no de los estados intermedios por los que puede pasar el sistema”. Es entonces suficiente



expresar la entalpía de las transformaciones químicas a una temperatura de referencia arbitraria (por ejemplo 1600 °C para un cálculo de carga completa, o la temperatura inicial del acero para un tratamiento sencillo de ajuste de temperatura) y expresar las variaciones de entalpía de los reactivos (productos de reacción respectivos) entre sus estados iniciales (finales respectivamente) y esta temperatura de referencia.

Por ejemplo, puede usarse el proceso descrito a continuación:

$$\Delta H_1 + \Delta H_R + \Delta H_2 + \text{pérdidas de calor} = 0$$

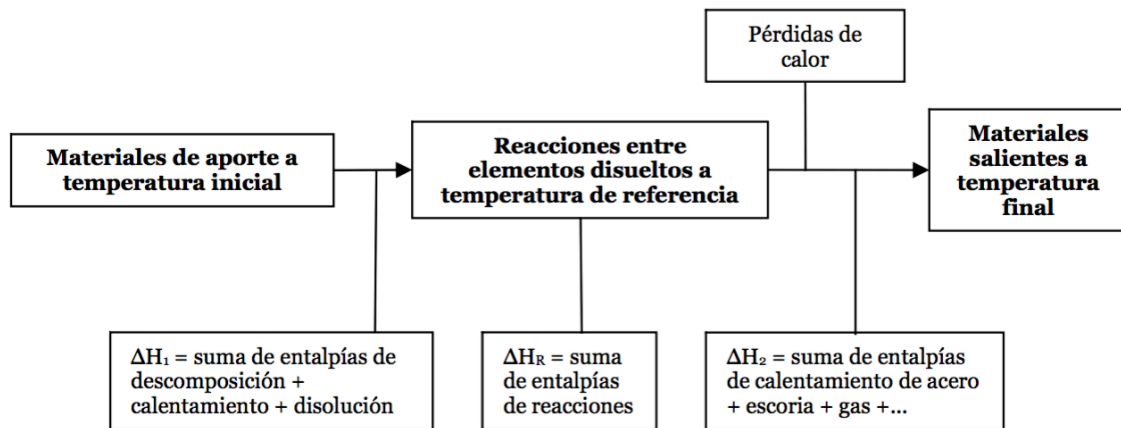


Fig. 17: Esquema de cálculo para el balance térmico (Steel University, 2011)

Los datos de las siguientes tablas son usados para calcular los términos ΔH_1 , ΔH_R y ΔH_2 . Los valores de ΔH_R están dados para los reactivos y productos de reacción a 1600°C. Como primera aproximación son independientes de la temperatura dentro de un rango de varios cientos de grados. Note que estos términos son positivos para reacciones endotérmicas y negativos para las reacciones exotérmicas.



Tabla 2: Entalpía de los diferentes materiales en función de la temperatura (Steel University, 2011)

	$H(1400\text{ °C}) - H(25\text{ °C})$ / MJ kg ⁻¹		C_p a 1400 °C / kJ K ⁻¹ kg ⁻¹	
Metal caliente (líquido a 1400 °C)	1.30 a 1.37		0.87	
	$H(1600\text{ °C}) - H(25\text{ °C})$ / MJ kg ⁻¹		C_p a 1600 °C / kJ K ⁻¹ kg ⁻¹	
Acero de baja aleación (líq - a 1600 °C)	1.35		0.82	
Escoria de afino (líq - a 1600 °C)	2.14		2.04	
Mineral de hierro Fe ₂ O ₃ (=> Fe _{líq} + O)	4.43			
CaO	1.50		1.03	
	$H(1600\text{ °C}) - H(25\text{ °C})$ / MJ kg ⁻¹ / MJ m ⁻³		C_p a 1600 °C / kJ K ⁻¹ kg ⁻¹ / kJ K ⁻¹ m ⁻³	
Ar	0.82	1.46	0.53	0.93
CO	1.86	2.33	1.28	1.61
CO ₂	1.90	3.78	1.36	2.71
N ₂	1.84	2.30	1.28	0.95
O ₂	1.70	2.43	1.17	1.68

Tabla 3: Entalpía de las reacciones de oxidación (Steel University, 2011)

Elemento X a Oxido X _n O _m	Calentamiento de 25 a 1600 °C + disolución / MJ kg ⁻¹	C_p elemento X a 1600 °C / kJ K ⁻¹ kg ⁻¹	Oxidación X a 1600 °C por O disuelto / MJ kg ⁻¹	Oxidación X a 1600 °C por gas O ₂ a 25 °C / MJ kg ⁻¹	Cantidad de O ₂	
					/ kg	/ m ³
C en CO	4.56* a 6.0**	2.025	-1.93* a -3.37**	-9.4* a -10.84**	1.33	0.93
C en CO ₂	4.56* a 6.0**	2.025	-15.35* a -16.79**	-30.35* a -31.79**	2.67	1.87
Al en Al ₂ O ₃	- 0.17	1.175	- 22.32	- 27.32	0.89	0.62
Cr en Cr ₂ O ₃	1.37	0.95	- 7.76	- 10.36	0.46	0.32
Fe en "FeO" líq	1.35	0.82	- 2.49	- 4.10	0.29	0.20
Fe en Fe ₂ O ₃	1.35	0.82	- 4.06	- 6.48	0.43	0.30
Mn en MnO	1.53	0.835	- 5.34	- 6.97	0.29	0.20
P en C ₃ P***	- 0.14	0.61	- 23.8	- 31.05	1.29	0.90
Si en C ₂ S***	- 1.43	0.91	- 24.4	- 29.35	1.14	0.80

(*) en acero líquido

(**) en metal caliente

(***) para formar 3 CaO-P₂O₅ y 2 CaO-SiO₂ con CaO necesario tomado a 1600 °CTabla 4: Reacciones del oxígeno disuelto en acero líquido a 1600°C (MJ/kg O₂) (Steel University, 2011)

A partir de gas O ₂ a 25 °C	A partir de FeO _x en escoria a 1600 °C	A partir de óxidos muy estables a 1600 °C
- 5.62	8.7	18



El cálculo del balance de energía se divide en tres pasos, en primer lugar se calientan los materiales hasta 1.600°C, a continuación se calculan las entalpías de reacción y, por último, se calculan las entalpías hasta las temperaturas de salida del acero, la escoria y los gases. Las pérdidas de calor se toman de 65 MJ/ t_{acero} .

$$\Delta H_1 + \Delta H_R + \Delta H_2 + \text{Pérdidas de calor} = 0$$

6.2.3. Calentamiento y descomposición de las entradas

Los materiales cargados se llevan desde su estado inicial hasta aquel de los elementos disueltos en metal líquido a 1600°C (excepto la cal calcinada que es simplemente calentada). Se emplea la Tabla 2.

$$\Delta H_1 = 0.00087(1600 - T_{\text{Arrabio}})P_{\text{Arrabio}} + 1.35P_{\text{Chatarra}} + 4.43P_{\text{Mineral}} + 1.5P_{\text{Cal}} - 5.62P_{\text{O}} + 0.82P_{\text{Argón}}$$

6.2.4. Reacciones de oxidación

Entalpía de las reacciones entre los elementos disueltos a 1600 °C. Se toman las entalpías de reacción de la Tabla 3.

$$\Delta H_2 = [-3.37(1 - PCR) - 16.79PCR]Q_C - 5.34Q_{Mn} - 23.8Q_P - 24.4Q_{Si} - 0.0296\left(\%Fe_{\text{Escoria}}\right)P_{\text{Escoria}}$$

6.2.5. Ajuste de temperatura de las salidas

El acero, la escoria y el gas se llevan a su temperatura final. Se emplea el calor específico obtenido de la Tabla 2.

$$\Delta H_3 = 0.00082(T_A - 1600)P_A + 0.00204(T_L - 1600)P_L + \left[0.00053(T_G - 1600)\right]P_{\text{Argón}} + \left[0.00128(T_G - 1600)(1 - PCR) + 0.00136(T_G - 1600)PCR\right]Q_C$$



6.3. Cálculo de la carga del convertidor

El cálculo se hace en base a 1.000 kg de acero. El arrabio se carga al convertidor con una temperatura de 1.330°C (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007). Para el soplado por el fondo con gas inerte se emplean unos 3,5 kg de Ar (2 Nm³) (Steel University). La carga mineral es de 25 kg de Wustita pura (FeO). Las composiciones de los materiales de entrada al convertidor son:

Tabla 5: Composiciones de los materiales de entrada al convertidor (Steel University)

Arrabio	% Fe	% C	%Mn	%P	%Si
	94,52	4,5	0,5	0,08	0,4
Chatarra	% Fe	% C	%Mn	%P	%Si
	99,82	0,05	0,12	0,015	-
Mineral	% Fe	%O			
	78	22			
Cal	%CaO	%MgO			
	98,2	1,8			
Dolomía	%CaO	%MgO			
	59,35	40,65			

En la siguiente tabla se incluyen las composiciones objetivo del acero y los requisitos de basicidad, %MgO para protección del refractario y pérdidas de hierro en la escoria. El índice de basicidad (CaO/SiO₂) objetivo es 2,5 y el PCR (CO₂/(CO+CO₂)) es 0,08. La temperatura de colada del acero y la escoria es de 1.650°C y la temperatura media de los gases 1.700°C (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007). Las pérdidas de calor se estiman en 65 MJ/tonelada de acero.



Tabla 6: Composiciones objetivo en los materiales de salida (Steel University)

Acero	% Fe	% C	%Mn	%P	%Si
	98,07-99,9	0,1-0,16	0-1,5	0-0,025	0-0,25
Escoria	%FeO	%MgO	Índice de basicidad(%)		
	0-30	8-12	2-3		

Tras simplificar las ecuaciones obtenidas en los diferentes balances y realizar una hoja de Excel que permite obtener los términos de las diferentes ecuaciones sustituyendo los valores conocidos, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

- Balance de hierro:

$$0.945P_{Arrabio} + 0.998P_{Chatarra} - 0.116P_{Escoria} = 991.660$$

- Balance de oxígeno:

$$0.0719P_{Arrabio} + 0.00126P_{Chatarra} - P_O + 0.0454P_{Escoria} = 3.390$$

- Balance de gas:

$$0.110P_{Arrabio} + 0.00122P_{Chatarra} - P_G = -1.952$$

- Balance de elementos de escoria, excepto Fe

$$0.0169P_{Arrabio} + 0.00189P_{Chatarra} + 1.576P_{Cal} + 0.425P_{Dolomia} - 0.805P_{Escoria} = 1.778$$

- Índice de basicidad:

$$0.0214P_{Arrabio} - 0.982P_{Cal} - 0.594P_{Chx} = 0$$

- Balance de magnesia:

$$0.018P_{Cal} + 0.407P_{Dolomia} - 0.1P_{Escoria} = 0$$



– Balance de energía:

$$-0.132P_{\text{Arrabio}} + 1.338P_{\text{Chatarra}} + 1.5P_{\text{Cal}} - 5.620P_{\text{O}} - 0.342P_{\text{Escoria}} = -122.876$$

Representando el sistema de 7 ecuaciones y 7 incógnitas, se puede resolver empleando la macro de Excel xnumbers.

$$\begin{pmatrix} 0.945 & 0.998 & 0 & 0 & 0 & -0.116 & 0 \\ 0.0719 & 0.00126 & 0 & 0 & -1 & 0.0454 & 0 \\ 0.110 & 0.00122 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0.0169 & 0.00189 & 1.576 & 0.425 & 0 & -0.805 & 0 \\ 0.0214 & 0 & -0.982 & -0.594 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0180 & 0.407 & 0 & -0.1 & 0 \\ -0.132 & 1.338 & 1.5 & 1.5 & -5.620 & -0.342 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{\text{Arrabio}} \\ P_{\text{Chatarra}} \\ P_{\text{Cal}} \\ P_{\text{Dolomía}} \\ P_{\text{oxígeno}} \\ P_{\text{Escoria}} \\ P_{\text{G}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 978.400 \\ 7.130 \\ 1.952 \\ 1.778 \\ 0 \\ 0 \\ -228.990 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} P_{\text{Arrabio}} \\ P_{\text{Chatarra}} \\ P_{\text{Cal}} \\ P_{\text{Dolomía}} \\ P_{\text{oxígeno}} \\ P_{\text{Escoria}} \\ P_{\text{G}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 889.588 \\ 143.366 \\ 12.692 \\ 11.119 \\ 59.130 \\ 47.483 \\ 95.900 \end{pmatrix}$$

Los resultados obtenidos se encuentran dentro de los límites razonables: 865-950 kg de arrabio y unos 150 kg de chatarra por tonelada de acero (Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), 2007).



7. Simulación del Convertidor LD

El objetivo de la simulación en *Basic Oxygen Steelmaking Simulation* (Steel University) es manejar un Convertidor LD de 260-290 t de capacidad. En él se realiza el afino de una mezcla de arrabio, chatarra y mineral de hierro, a la que se deben añadir fundentes (cal y dolomía) para la formación de la escoria. El proceso crítico es el de decarburación, pues se debe pasar de un 4,5% de carbono en el arrabio a un 0,1-0,16% C en el acero. También es importante el proceso de defosforación, pasando de 0,08% a 0-0,025%.

Al comienzo de la simulación se elige el grado del acero, acero de construcción convencional con la composición indicada en la Tabla 6. A continuación se introducen las masas de materiales que se alimentan al convertidor.

Se introducen todos los materiales, menos la mitad de la cal que se introducirá cuando el Si esté siendo eliminado, aproximadamente a los 5 minutos. La chatarra se divide en ligera y pesada, que necesita más tiempo para fundirse.

Raw Material	Unit cost		Mass		Cost
Hot metal	\$210.00/t	▼	245	▲	\$ 51450
Light Scrap	\$0.15/kg	▼	20000	▲	\$ 3000
Heavy Scrap	\$0.13/kg	▼	19400	▲	\$ 2522
Iron Ore	\$0.14/kg	▼	6900	▲	\$ 966
Lime	\$0.09/kg	▼	1750	▲	\$ 149
Dolomite	\$0.09/kg	▼	3100	▲	\$ 264
Total			296		\$ 58350
Cost per metric tonne					205

Fig. 18: Materiales de entrada al convertidor (Steel University)



Se introduce la temperatura del arrabio y el flujo de inyección de Argón por el fondo.

Select hot metal temperature (°C)

▼

1330

▲

N.B. All other materials are at room temperature, i.e. 20°C

Select bottom stirring gas flow rate (Nm³)

▼

0,10

▲

N.B. Cost of nitrogen gas is: \$0.07/Nm³

Fig. 19: Temperatura del arrabio y flujo de Argón (Steel University)

En la siguiente imagen se introduce un resumen de todos los datos de entrada y los requisitos del tratamiento de conversión (composición del acero y de la escoria, masa y temperaturas de colada requeridas).

User Level
University Student

Steel Grade
Construction Steel

Hot metal temperature
1330°C

Stirring gas flow rate
0.1 Nm³/min/tonne

Temperature required
1630-1660°C

Mass required
260-290 tonnes

Maximum time
1h 20m

Slag composition
Basicity: 2.0-3.0
%MgO: 8-12
%FeO: 0-30

START SIMULATION ▶

Materials

Raw Material	Unit cost	Mass	Cost
Hot metal	\$210.00/t	245 t	\$ 51450
Light Scrap	\$0.15/kg	20000 kg	\$ 3000
Heavy Scrap	\$0.13/kg	19400 kg	\$ 2522
Iron Ore	\$0.14/kg	6900 kg	\$ 966
Lime	\$0.09/kg	1750 kg	\$ 149
Dolomite	\$0.09/kg	3100 kg	\$ 264
Total		296	\$ 58350
Cost per metric tonne			205

Composition

Element	Result		Min	Max
C*	3.884	✘	0.1	0.16
Si*	0.345	✘	0	0.25
Mn*	0.447	✔	0	1.5
P	0.071	✘	0	0.025
S*	0.019	✔	0	0.1
Cr	0.036	✔	0	0.1
Mo	0.019	✔	0	0.04
Ni	0.055	✔	0	0.15
Cu	0.003	✔	0	0.15
N*	0.000	✔	0	0.05
Nb	0.000	✔	0	0.05
Ti	0.002	✔	0	0.01

Fig. 20: Resumen de la configuración de la simulación (Steel University)

Tras finalizar la configuración se inicia la simulación. Al comienzo del soplado es importante formar una buena escoria espumante que atrape las impurezas, por esta razón se posiciona la lanza ligeramente elevada. Se introduce un flujo de gas inerte de 0,10 Nm³/t·min y un flujo de oxígeno de 1,9 Nm³/t·min.

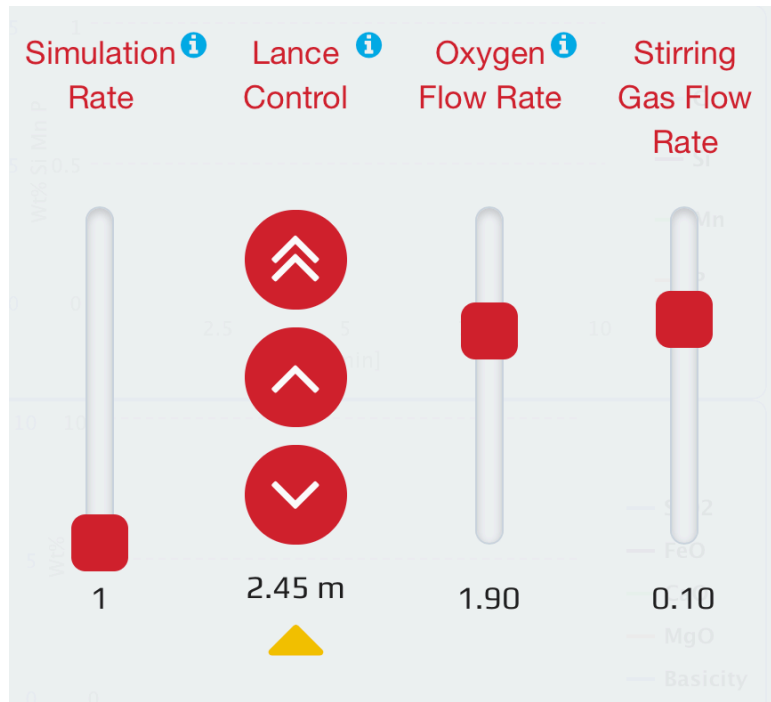


Fig. 21: Configuración de la lanza de oxígeno al comienzo del soplado (Steel University)

Una vez formada la escoria, se baja la lanza hasta la posición de operación y se aumenta ligeramente el flujo de oxígeno.

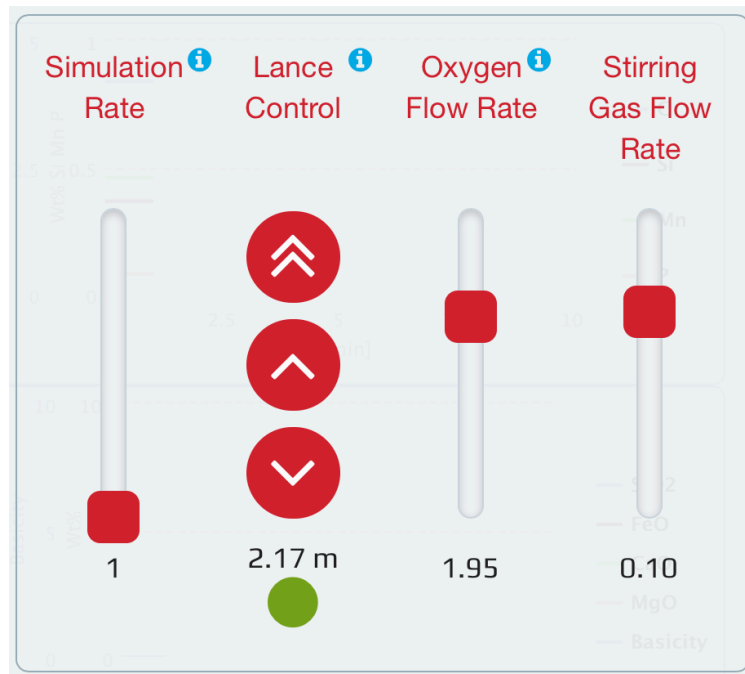


Fig. 22: Configuración de la lanza para la conversión (Steel University)

Tras cinco minutos, cuando el Si ha sido prácticamente eliminado, se adiciona el resto de la cal.

Make Additions ✕

Raw Material	Unit cost	Mass	Cost
Iron Ore	\$140.00/t	<input type="text" value="0"/>	\$ 0.00
Lime	\$85.00/t	<input type="text" value="1750"/>	\$ 148.75
Dolomite	\$85.00/t	<input type="text" value="0"/>	\$ 0.00
Total		1750 kg	\$ 148.75

Fig. 23: Adición de cal (Steel University)

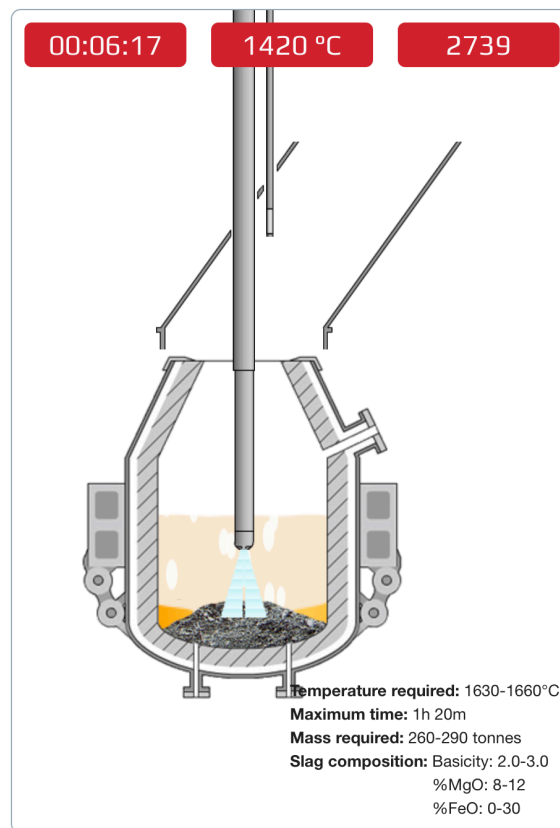


Fig. 24: Proceso de conversión (Steel University)

Al finalizar el soplado de oxígeno, se realiza el soplado metalúrgico con argón. Debe prestarse atención al momento de finalización de la conversión para evitar un sobrosoplado que implica una decarburación excesiva. Este soplado permite homogeneizar el baño y controlar la temperatura de colada.

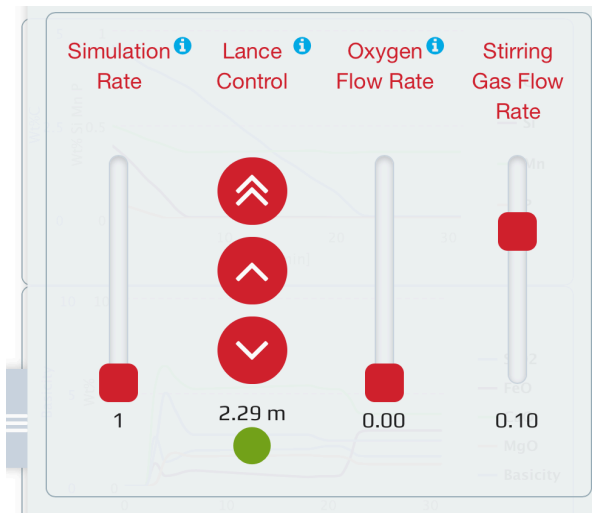


Fig. 25: Soplado metalúrgico (Steel University)

Por último se realiza la colada del acero a la cuchar.

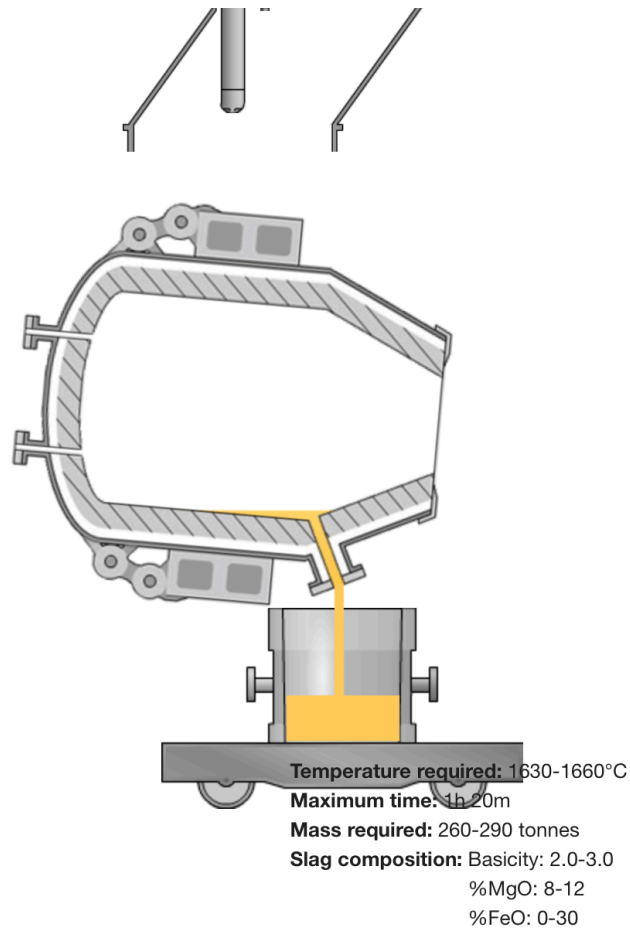


Fig. 26: Colada del acero (Steel University)



Después de la finalización de la colada, se visualiza el resultado del proceso. La conversión se ha realizado en 28 min, con una temperatura de colada de 1.649°C, dentro de los márgenes requeridos (1.630-1.660°C) y la masa de acero producida ha sido de 270 toneladas. En la Fig. 27 se observa la composición final obtenida, comparada con la exigida y en la Fig. 28 se representa la evolución de la composición en el tiempo de soplado.

Element	Current		Min	Max
C*	0.13179	✓	0.1000	0.1600
Si*	0.00069	✓		0.2500
Mn*	0.27806	✓		1.5000
P	0.00040	✓		0.0250
S*	0.02171	✓		0.1000
Cr	0.00375	✓		0.1000
Al*				
B				
Ni	0.00585	✓		0.1500
Nb	0.00001	✓		0.0500
Ti	0.00022	✓		0.0100
V	0.00007	✓		0.0100
Mo	0.00206	✓		0.0400
Ca				
N*		✓		0.0500
H*				
O*	0.00089			

Fig. 27: Composición final del acero (Steel University)

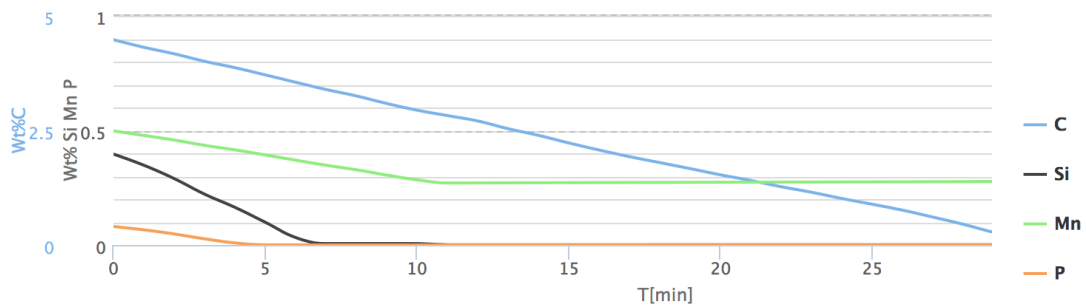


Fig. 28: Evolución de la composición del acero (Steel University)



También se verifica que la composición de la escoria cumple con las exigencias del proceso, con el fin de minimizar las pérdidas metalúrgicas y evitar dañar el refractario.

Element	Current		Min	Max
Al ₂ O ₃	0.0000			
CaO	46.5496			
Cr ₂ O ₃	0.0000			
FeO	21.4080	✓		30
MgO	11.9749	✓	8	12
MnO	3.1611			
SiO ₂	15.8018			
P	1.0567			
S	0.0479			
SlagBasicity	2.9458	✓	2	3

Fig. 29: Composición de la escoria (Steel University)

Por último se representa la evolución de las temperaturas del baño en función del contenido en carbono a lo largo del proceso. Esta temperatura debe encontrarse en todo momento por encima de la curva *liquidus* para evitar que solidifique parte del material, inutilizando la colada y generando una parada. La temperatura aumenta durante el proceso a causa de la oxidación de los elementos presentes en el arrabio, la chatarra y el mineral, por esta razón evita la curva, aunque debe evitarse un excesivo calentamiento que dañe el refractario o afecte a la calidad del producto.

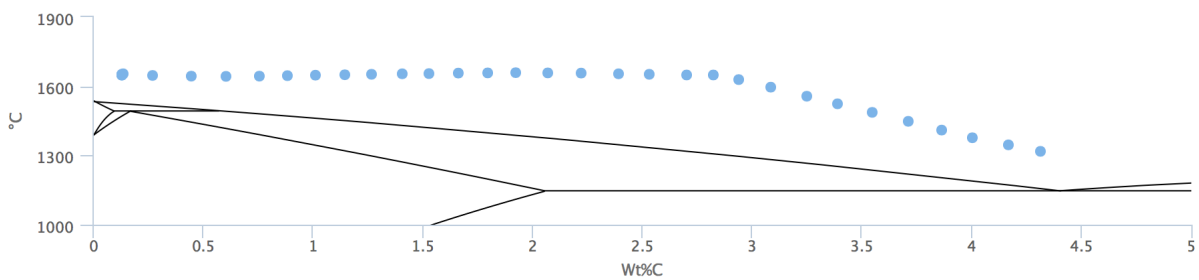


Fig. 30: Evolución de la temperatura del baño (Steel University)



8. Conclusiones

A lo largo de este trabajo se ha estudiado brevemente el proceso siderúrgico completa, con el fin de comprender la importancia y el papel del Convertidor LD en el mismo.

Para ello se han reconocido los orígenes históricos de la siderurgia, que marca el comienzo de la Edad de Hierro, hacia el 3.500 a.C. En un principio la producción era artesanal y con muy bajas productivades. No es hasta el final de la Edad Media cuando comienzan a desarrollarse tecnologías que permiten obtener grandes productividades. El precursor del horno alto, el Flussofen, se desarrolla en el siglo XIV, aunque su expansión fue lenta. A partir de entonces, especialmente tras la eclosión de la Revolución Industrial, tiene lugar un gran aumento de la producción de hierro.

Con el desarrollo de los convertidores en la segunda mitad del siglo XIX, por fin se consigue producir acero en grandes cantidades, pues los métodos de decarburación disponibles hasta entonces tenían bajas productividades y grandes consumos. El convertidor LD encabezó rápidamente la producción, desplazando rápidamente a los modelos previos, dadas sus numerosas ventajas. A día de hoy, es la tecnología más empleada, aunque con variantes como el soplado por el fondo o el soplado mixto desarrolladas para mejorar su eficiencia.

Conocido el proceso siderúrgico y el papel que desarrolla el convertidor se estudia éste en profundidad. Con este propósito se reconocen las instalaciones de la acería LD, pero el estudio se centra en el proceso de conversión. Para ello se analizan los materiales necesarios para el afino, las secuencias de operación y las reacciones que tienen lugar.

Una vez realizado este estudio, se abordan los balances de masa y energía del proceso, previo pasa a la simulación del proceso. La resolución de los balances permite obtener los pesos de cada material de alimentación que deben ser empleados para cumplir las exigencias de producción. Es importante recalcar que el proceso de conversión es muy sensible a cualquier mínimo cambio. Por esta razón, debe elegirse con precaución todos los parámetros empleados, como la temperatura del arrabio o la de los gases de escape.



Con la distribución de materiales empleada, se comienza la simulación. Se presta especial atención a la decarburación, puesto que se trata del proceso crítico. En la simulación se siguen las secuencias de operación indicadas en el **apartado 4.3**. En primer lugar, se busca conseguir una buena escoria espumante que atrape las impurezas, sitúan la lanza de oxígeno ligeramente elevada. A continuación, se desplaza a la posición óptima de operación. Tras la eliminación del silicio, se adiciona la mitad de la cal (el resto se añade durante la carga del convertidor). Tras la finalización del soplado de oxígeno, se realiza un soplado metalúrgico con gas inerte para homogeneizar el baño. El proceso finaliza cuando la composición del acero llega a la requerida.

Además de la composición del acero, es de gran importancia controlar la temperatura del baño y la composición de la escoria, puesto que si se descontrolasen se dañaría el refractario y se vería afectada la calidad del producto. El control de la temperatura se realiza añadiendo refrigerantes (chatarra y mineral) junto al arrabio y modificando el flujo de oxígeno y de argón. El control de la escoria se realiza con las adiciones de cal y dolomía, siendo éste un proceso crítico pues el índice de basicidad y el contenido en magnesita debe encontrarse dentro de un margen muy estrecho.

Se trata por tanto el Proceso LD de una parte fundamental del ciclo siderúrgico, que requiere de una operación y muestreo muy cuidadoso, pues es muy sensible a pequeñas variaciones y las exigencias del producto (composición y temperatura) son muy estrictas.



9. Bibliografía

- [1] Ahindra Ghosh, A. C. (2008). *Ironmaking and Steelmaking*. (P. Learning, Ed.) Nueva Delhi.
- [2] R.D. Pehlke et al (1977). *BOF Steelmaking*. (ISS-AISME, Ed.)
- [3] ArcelorMittal España. (n.d.). *Producimos acero*. Recuperado 30 de Mayo de 2016 de <http://spain.arcelormittal.com/who-we-are/management.aspx>
- [4] Brahma Deo, R. B. (1993). *Fundamentals of Steelmaking Metallurgy*. (P. Hall, Ed.)
- [5] del Olmo Roales, A. (2008). *Desarrollo Sostenible en la Utilización de Materias Primas*.
- [6] Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba). (2007). *El Proceso Siderúrgico* (2ª ed.). Avilés.
- [7] J. Szekely, J. E. (1988). *The Mathematical and Physical Modelling of Primary Metals Processing Operations*. (Wiley, Ed.) Nueva York.
- [8] Ricketts, J. (2000). *History of Ironmaking*. (I. a. Society, Ed.)
- [9] *Steel University*. Recuperado 31 de mayo de 2016 de <http://www.steeluniversity.org/play/basic-oxygen-steelmaking-simulation/>
- [10] Steel University. (2011). *Simulación de la Metalurgia en el Convertidor LD: Guía del Usuario*. World Steel Association.
- [11] Turkdogan, E. (1996). *Fundamentals of Steelmaking*. (T. I. Materials, Ed.) Londres.
- [12] UNESID. (1998). *La Fabricación del Acero* (2002 ed.). Madrid: UNESID.
- [13] UNESID. (1987). *La Siderurgia Española: El Proceso Siderúrgico* (2ª ed.). Madrid: UNESID.
- [14] United States Steel. (1984). *The Making, Shaping and Treating of Steel* (10ª ed.). (A. o. Engineers, Ed.) Pittsburg, Pennsylvania.
- [15] United States Steel. (1998). *The Making, Shaping and Treating of Steel* (11ª ed.). (A. o. Engineers, Ed.) pittsburgh, Pennsylvania.



- [16] Vignes, A. (2011). *Extractive Metallurgy 3; Processing Operations and Routes*. (I. John Wiley & Sons, Ed.)
- [17] World Steel Association. (2012). *The White Book of Steel*.