



**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

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

**Máster en Ingeniería de Minas**



**Trabajo Fin de Máster**

**Balance de masa, energía y simulación del  
Convertidor LD**

**Autor: Javier Coronado García**

**Tutor: Francisco Blanco Álvarez**

**Oviedo, Julio de 2018**

## Contenido

1.	Introducción .....	6
2.	Evolución histórica de la producción de acero .....	7
2.1.	La Forja Catalana .....	8
2.2.	Hornos Osmund y Stückofen .....	9
2.3.	Horno Flussofen .....	12
2.4.	Coque Mineral .....	12
2.5.	Horno de Pudelar o de Reverbero .....	13
2.6.	Convertidor Bessemer .....	14
2.7.	Convertidor Thomas .....	16
2.8.	Horno Siemens.....	17
3.	La Siderurgia actual.....	20
4.	La Acería LD.....	23
4.1.	Instalaciones.....	24
4.1.1.	Cuchara.....	25
4.1.2.	El convertidor LD .....	28
4.1.3.	Revestimiento Refractario del Convertidor LD. ....	29
4.1.4.	Lanza de inyección de oxígeno.....	30
4.1.5.	Sublanza .....	34
4.2.	Materiales presentes en el Convertidor LD .....	35
4.2.1.	Arrabio.....	35
4.2.2.	Chatarra .....	36
4.2.3.	Mineral del Hierro. ....	37
4.2.4.	Fundentes.....	37
4.2.5.	Ferroaleaciones.....	39
4.2.6.	Oxígeno.....	39
4.2.7.	Gases Inertes .....	39
4.3.	Operación del Convertidor LD.....	40
4.3.1.	Carga del Convertidor.....	40
4.3.2.	Soplado de oxígeno.....	41
4.3.3.	Colada del Acero. ....	43
4.4.	Sistema LBE (“Lanza-Burbujeo-Equilibrio”).....	44
5.	Reacciones del convertidor LD .....	46
5.1.	Eliminación del Silicio .....	47
5.2.	Eliminación del Manganeso .....	48
5.3.	Eliminación del Fósforo.....	48

5.4.	Eliminación del Azufre .....	52
5.5.	Eliminación del Carbono .....	54
6.	Balance de Masa y Balance Térmico .....	55
6.1.	Balance de Masa .....	55
6.2.	Balance Térmico.....	56
6.2.1.	Establecimiento del Balance Térmico .....	56
7.	Cálculo de la Carga .....	59
7.1.	Balances de Masa .....	60
7.1.1.	Balance de Hierro .....	60
7.1.2.	Balance de Oxígeno .....	60
7.1.3.	Balance de Gas .....	63
7.1.4.	Balance de elementos de escoria, excepto Fe.....	64
7.1.5.	Índice de basicidad .....	65
7.1.6.	Balance de Magnesia .....	65
7.2.	Balance de Energía .....	66
7.3.	Implementación de las ecuaciones de equilibrio .....	69
8.	Simulación del Convertidor LD.....	72
9.	Conclusiones .....	82
10.	Glosario de Términos .....	83
11.	Bibliografía .....	84

## Índice de Figuras

Figura 1.	Forja Catalana (Durfee, 1890).....	9
Figura 2.	Horno Osmund (Alamy, s.f.).....	10
Figura 3.	Horno Stückofen (Turner and Roberts-Austen, 1908) .....	11
Figura 4.	Horno de Pudelado o Reverbero (Museo de la Siderurgia y la Minería de Castilla y León, s.f.) .....	14
Figura 5.	Convertidor Bessemer (I Love My Architect, 2010) .....	15
Figura 6.	Convertidor Thomas (González Baquet, s.p.) .....	17
Figura 7.	Horno Siemens (Villafaña, 2005)(González Baquet, s.p.).....	18
Figura 8.	Diagrama de flujo del Proceso Siderúrgico (Parte I/II) (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007).....	21
Figura 9.	Diagrama de flujo del Proceso Siderúrgico (Parte II/II) (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007).....	22
Figura 10.	Instalaciones de la Acería LD (González, 2015) .....	24

Figura 11. Cuchara de Arrabio(ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)(Chinarailcart.com, 2014).....	26
Figura 12. Cuchara de Acero. Izda. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007) dcha. (STLfinder, 2018).....	27
Figura 13. Sección de un Convertidor LD. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)..	28
Figura 14. Refractario del Convertidor LD. (Amoss, 2010).....	30
Figura 15. Lanza de Inyección de Oxígeno. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007).	31
Figura 16. Cabezas de Lanza de Inyección de Oxígeno. (Barker et al., 1998).....	31
Figura 17. Lanza con inyección de oxígeno en zona de post-combustión (Barker et al., 1998).....	33
Figura 18. Salpicado de escoria por inyección de nitrógeno. (Barker et al., 1998)	34
Figura 19. Inyector de gases inertes por el fondo del Convertidor LD. ....	40
Figura 20. Carga del Convertidor. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007) .....	41
Figura 21. Zonas afectadas por la inyección del oxígeno. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007).....	43
Figura 22. Evolución de los componentes del acero durante el proceso de soplado en el convertidor BOF. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007). ....	47
Figura 23. Defosforación en el convertidor LD por reacción acero-escoria. (Turkdogan, 2010). ....	50
Figura 24. Ratio de defosforación como función del contenido en FeO de escorias con diferentes basicidades. (Turkdogan, 2010).....	52
Figura 25. Esquema de cálculo para el balance térmico. (Steel University, 2011).	57
Figura 26. Inputs del sistema para el cálculo de la carga del convertidor BOF.....	69
Figura 27. Matriz de implementación de las ecuaciones de equilibrio de la carga del convertidor BOF.....	70
Figura 28. Resultados (Pesos de los componentes de la carga del convertidor BOF).	70
Figura 29. Input costes unitarios de materiales y coste por tonelada de acero producido.....	71
Figura 30. Carga del convertidor.....	72
Figura 31. Selección de temperatura y soplado de fondo. ....	73
Figura 32. Resumen de condiciones, parámetros y carga previo a la simulación.	74
Figura 33. Formación de la escoria espumante. ....	75
Figura 34. Muestra sublanza (análisis instantáneo - contenido en carbono y temperatura del baño).....	76
Figura 35. Análisis químico del baño mediante la toma de muestra con la sublanza.	76
Figura 36. Gráficas evolución de la simulación. ....	77
Figura 37. Reducción del caudal de oxígeno para el control de temperatura. ....	78

Figura 38. Sangría del convertidor.....	78
Figura 39. Resumen final de la simulación.....	79
Figura 40. Composición final del acero producido.....	80
Figura 41. Composición final de la escoria.....	80
Figura 42. Evolución de la colada. (Composición acero, composición escoria y temperatura del baño).....	81

## Índice de Tablas

Tabla 1. Valores de entalpía para los materiales como una función de temperatura (Steel University, 2011).....	57
Tabla 2. Reacciones del oxígeno disuelto en acero líquido a 1600°C (MJ/Kg oxígeno) (Steel University, 2011).....	57
Tabla 3. Entalpía de las reacciones de oxidación para diversos elementos. (Steel University, 2011). .....	58
Tabla 4. Entalpía de la descomposición de ferroaleaciones a 25°C. (Steel University, 2011).58	
Tabla 5. Material de entrada y salida del Proceso de Metalurgia en el Convertidor LD. Modificado de (Steel University, 2011) .....	59

# 1. Introducción

Es muy importante, a la vez que interesante, hacer una breve revisión de la evolución a lo largo de la historia de la producción y utilización del hierro. Esto permite obtener un mejor conocimiento de los procedimientos utilizados antiguamente, creando una base firme, que hace más fácil la comprensión de los procedimientos más modernos, que fueron basados a partir de éstos. El estudio de la química y la física involucradas desde los inicios del proceso siderúrgico también sienta las bases necesarias para entender los procesos modernos mucho más complejos y complicados.

No pasó mucho tiempo para que los humanos descubrieran que los metales brindaban poderosas herramientas. Fueron tan importantes los metales que ahora usamos sus nombres para definir diferentes períodos de la vida humana temprana. Quizás el más significativo— y el que permanece con nosotros hasta ahora—es la Edad del Hierro.

Actualmente la industria siderúrgica se dedica principalmente a la fabricación de acero y sus derivados tanto en composición como en forma. Una parte fundamental de este trabajo es la de estudiar en detalle el proceso por el cual se produce la mayor parte de acero hoy en día, el proceso LD.

Además de este estudio teórico, uno de los principales objetivos es la comprensión y el desarrollo de los balances de masa y energía que tienen lugar en el proceso de conversión del arrabio en acero, lo cual permite estimar los materiales que son necesarios para la producción de un determinado acero en función de su composición y su volumen de producción.

Además como objetivo final se implementará el conocimiento y el desarrollo del sistema de cálculo de la carga del convertidor para alimentar un simulador de convertidor LD que permite realizar una colada y obtener datos del acero resultante.

## 2. Evolución histórica de la producción de acero

Los primeros indicios arqueológicos encontrados con presencia de hierro datan de hace más de 3500 a.C. aunque no aparezcan representados hasta cientos de años más tarde en pinturas de la antigüedad. Estos descubrimientos incluyen instrumentos hechos a partir de hematites en Egipto. También se conocen casos en varios puntos del mundo (Irán, Egipto, China) donde el hierro fue extraído de meteoritos compuestos por una mezcla hierro-níquel que al haber sido trabajada en frío o a baja temperatura conserva sus propiedades cristalinas (estructura cristalina de Widmanstätten) que permiten identificar con certeza este tipo de material. (World Steel Association, 2012)

Debido al mayor grado de dificultad que supone obtener hierro si se compara con otros metales como el estaño o el cobre, los cuales pueden trabajarse en frío o fundirse y alearse en hornos muy simples (como los usados en la cocción de cerámica), el hierro requiere ser fundido a temperaturas mucho más altas que sólo son conseguidas en hornos específicamente diseñados para este fin. Es por esto que no sorprende el hecho de que la Edad del Bronce preceda a la Edad del Hierro y que la producción de hierro no fuese dominada hasta pasados unos cuantos miles de años después de la expansión de la metalurgia del bronce. (World Steel Association, 2012)

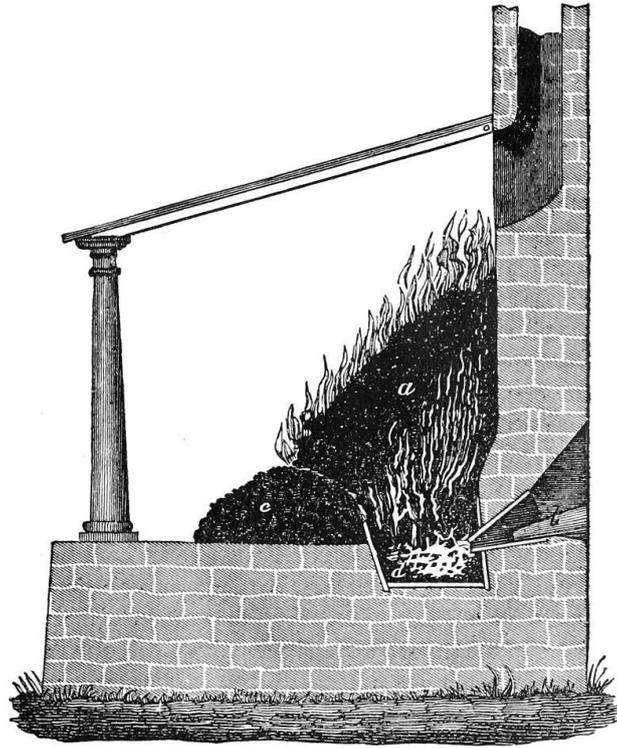
La Edad del Hierro es la época en que el hierro pasó a sustituir al bronce en la fabricación de herramientas, sin embargo, esta transición tuvo lugar a lo largo de un periodo de tiempo según la tecnología se iba expandiendo por el mundo. Para dar una idea de las diferentes transiciones hacia la Edad del Hierro, Mesopotamia la alcanzó alrededor del año 900 a.C. mientras que Europa Central la alcanzó en torno al 500 a.C. (González Baquet, s.p.)

En los inicios de la Edad de Hierro, éste era obtenido en hornos en los que mediante el uso de fuelles, la circulación de aire era forzada a través de un lecho de mineral de hierro y carbón. El monóxido de carbono producido durante la combustión del carbón actúa como reductor de los óxidos de hierro presentes en el mineral y los transforma en hierro metálico. Aun así, este proceso no alcanzaba la temperatura necesaria para fundir el hierro con lo que el metal resultante era una masa esponjosa de hierro que se recogía en la parte inferior del horno y que era conocida como hierro esponja. Los poros del hierro esponja se rellenaban con ceniza y escoria. Posteriormente se recalentaba y reblandecía para trabajarlo mecánicamente y forzar la salida de la escoria fundida dentro de la esponja. Este proceso da lugar al hierro forjado que es una aleación maleable y relativamente blanda. (González Baquet, s.p.)

Simultáneamente a la transición del bronce al hierro se descubrió la carburación del hierro, proceso por el cual se aumenta su contenido en carbono. La esponja obtenida contiene un pequeño contenido en carbono de inicio pero los herreros descubrieron que al calentar el hierro forjado en un lecho de carbón vegetal y enfriándolo rápidamente en agua o aceite aumentaba la dureza del material. Lo que este proceso hace es convertir las capas externas del material en acero, una aleación de hierro y carburos de hierro que confería una dureza muy superior y menos frágil que la del hierro forjado y del bronce que empezó a sustituir debido a sus propiedades superiores. (González Baquet, s.p.)

## 2.1. La Forja Catalana

En el siglo VIII las forjas catalanas presentaron una evolución con respecto a las forjas tradicionales. Esta tecnología contaba con un hogar construido en piedra, de unos 0,9 m de altura y 0,75 m de diámetro. Un poco por encima de la base del hogar cuenta con una abertura que permite la introducción de una boquilla o tobera que conectada a un fuelle manual permite incrementar la cantidad de aire que circula por la forja. La operación de la forja consistía en depositar en la base un lecho de carbón vegetal hasta la tobera, altura por encima de la cual se depositaba el mineral de hierro, que era posteriormente cubierto con más carbón vegetal tal y como se muestra en la Figura 1. La masa esponjosa obtenida podía llegar a los 160 kg la cual a diferencia de tecnologías más antiguas podía ser recogida sin destruir la estructura de piedra. Además, esta cantidad de hierro era producida en tan sólo 5 horas, tiempo en el que previamente solo era posible la producción de unos 20 kg, lo cual supone un aumento muy significativo en la productividad. (Durfee, 1890)(González Baquet, s.p.)



*Figura 1. Forja Catalana (Durfee, 1890)*

La propia tecnología sufrió modificaciones, seguramente asociadas a la introducción de sistemas hidráulicos para la inyección de aire que aumentaron los flujos de aire con respecto a los fuelles manuales operados por los trabajadores de la herrería. Este tipo de sistemas eran basados en el efecto Venturi o en molinos hidráulicos. (González Baquet, s.p.)

Esta tecnología fue exportada a otras regiones donde fue posteriormente modificada entre los años 900 y 1300 para explotar el uso de la energía hidráulica para la inyección de aire y conseguir mayores producciones en forjas cada vez más grandes, sin embargo el producto obtenido seguía siendo la misma masa esponjosa que debía ser posteriormente forjada y carburizada.

Las evoluciones de la Forja Catalana más conocidas se encuentran en el horno Osmund predominante en Suecia y en el horno Stuckofen en Alemania que son mostrados a continuación.

## 2.2. Hornos Osmund y Stückofen

Como ya se ha comentado, el horno Osmund, de uso extendido en Suecia, contaba con una acumulación de material de 2 a 2,4 m de altura dentro de su característica forma de

tronco de cono, es decir, a medida que se desciende su diámetro se ve reducido como se ve en la Figura 2.

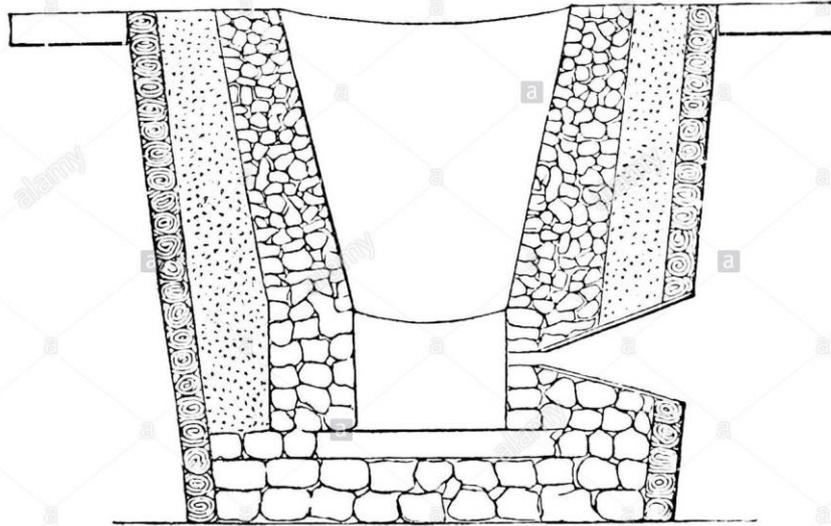


Figura 2. Horno Osmund (Alamy, s.f.)

El horno Stückofen era común a lo largo del Rin en Alemania y cuyo hogar era un espacio alargado entre 3 y 4,8 m de largo, el cual estaba hecho de piedra y con forma de 2 conos truncados conectados en el medio por sus respectivos diámetros más anchos tal y como se muestra en la Figura 3. La carga del horno era realizada manualmente mediante el uso de cestas desde la parte superior del horno. La inyección del aire al igual que en su predecesor, la Forja Catalana, era realizada mediante el uso de toberas cuyo aire provenía de un sistema hidráulico que accionaba 2 fuelles de manera que el aporte de aire era constante. (González Baquet, s.p.)

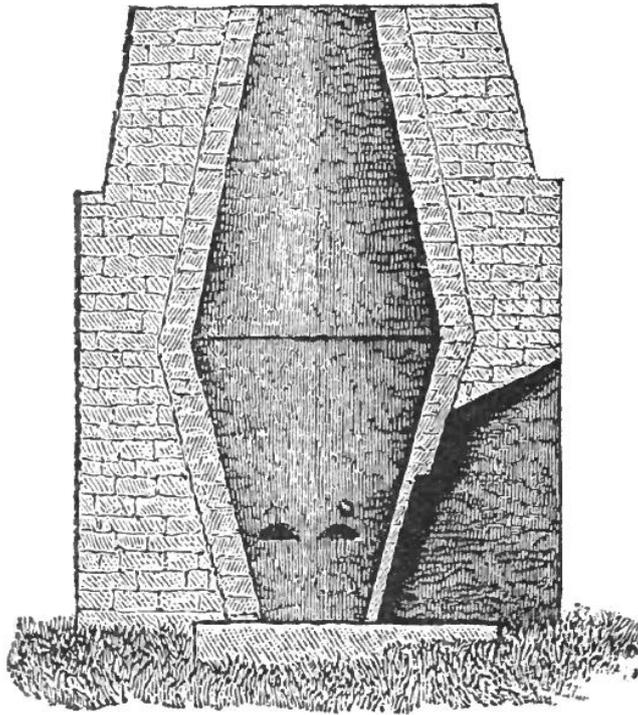


Figura 3. Horno Stückofen (Turner and Roberts-Austen, 1908)

A su vez, el horno Stückofen cuenta con una apertura en la base para la extracción de escoria. Era necesaria su constante extracción para que el mineral de hierro se encuentre en contacto constantemente con el carbón vegetal y no ralentice el proceso de reducción de los óxidos de hierro que mejora la maleabilidad del material resultante. El horno contaba con una pieza en la mitad inferior de unos  $0,6 \text{ m}^2$  que se retiraba una vez finalizado el proceso para extraer el producto final cuyo peso podía oscilar entre los 200 y los 300 kg. Este tipo de horno conseguía producciones anuales entre 100 y 150 t, superando ampliamente a sus predecesores. (Durfee, 1890)(González Baquet, s.p.)

Debido al mayor tiempo de residencia del mineral de hierro en el horno (de mayor tamaño) y mayor apilamiento de material, el mineral era expuesto a mayores temperaturas y no solo era capaz de la reducción de los óxidos sino que también conseguía absorber cierta cantidad de carbono, reduciendo su temperatura de fusión lo que significaba que parte del producto final era hierro fundido. Este subproducto era considerado un desecho del proceso debido a su fragilidad dado que no se podía trabajar mecánicamente en la forja, es por ello que era recargado en el horno o simplemente desechado. (Durfee, 1890)(González Baquet, s.p.)

### 2.3. Horno Flussofen

La llegada de las fundiciones de acero se retrasó en Europa debido a que la tecnología disponible apenas alcanzaba los 1000°C o quizás porque no se deseaba alcanzar temperaturas superiores dado que en aquel momento el producto buscado no eran las fundiciones sino el hierro esponja que permitía obtener hierro forjado. Sin embargo avances tecnológicos en materia bélica (en particular el uso de cañones) pudieron ser los impulsores del cambio en la industria siderúrgica que aumentó la producción de fundición para la fabricación de los ya mencionados cañones en detrimento del hierro forjado para la fabricación de espadas. (González Baquet, s.p.)

Este cambio en el producto deseado fue a su vez acompañado por un cambio en la tecnología utilizada para su obtención dado que ahora se buscaba la producción total de hierro fundido y es cuando en el siglo XIV aparece el horno Flussofen en el valle del Rin. Su expansión fue relativamente lenta puesto que no existe mención alguna en textos de siglos posteriores indicando su relativa popularidad. Este horno es considerado el primer horno alto, que tomó como diseño inicial el del horno Stückofen. Las principales diferencias fueron la inclusión de una compuerta para la retirada de escoria en vez de la apertura del Stückofen y un orificio para la extracción de la colada en la parte inferior del horno. Para evitar que los moldes de arena donde se colaba el hierro fundido se mojasen y provocasen explosiones, se instaló un tejado adyacente al horno. Las dimensiones del hogar se vieron reducidas dado que el producto obtenido es mucho más denso. (González Baquet, s.p.)

### 2.4. Coque Mineral

La elevada tasa de deforestación y el comienzo de la escasez de carbón vegetal empujó a los productores de hierro a buscar nuevas fuentes de energía. Esta fue el carbón, en todas sus variantes, bituminoso, antracita, turba, coque, etc. El uso de antracita y coque fue similar y coexistieron con el uso de carbón vegetal a lo largo del siglo XVIII. La transición hacia carbón mineral se inició en primera instancia en Inglaterra y Escocia donde acusaron la deforestación en mayor medida que en Europa continental. (World Steel Association, 2012)

Fue Abraham Darby en 1708 quien comenzó a producir coque a partir de carbón mineral para complementar el uso del cada vez más caro carbón vegetal. En sus inicios el carbón de coque se producía de manera similar al carbón vegetal. Darby continuó

usando coque, aumentando la proporción de dicho combustible hasta que en 1735 comenzó a usarlo exclusivamente en la producción de hierro. El inicio de la expansión del uso del coque se retrasó hasta 1750 y no fue completada en el Reino Unido hasta 1771 cuando los 27 hornos altos en operación en Reino Unido se encontraban produciendo hierro usando carbón de coque.

El uso de este combustible fue inicialmente pensado como una manera de reducir el coste del combustible y para aumentar la temperatura del hierro fundido, la cual mejoraba la capacidad del metal para producir planchas delgadas. Sin embargo, los beneficios más importantes fueron otros, el coque permitió incrementar la producción de hierro reduciendo el consumo de combustible dado que la temperatura de combustión del coque es más alta que la alcanzada con carbón vegetal. El coque también es capaz de producir una combustión más profunda en el horno delante de las toberas lo cual aumentaba la capacidad efectiva del horno. Otro punto positivo es la mayor resistencia mecánica del coque, que es capaz de aguantar mayor carga de columna de material permitiendo construir hornos más grandes. Esta mayor resistencia mecánica también contribuye a la mejoría de la permeabilidad del horno dado que la circulación de aire es mucho mayor a igualdad de presión. La contrapartida del carbón de coque reside en su mayor densidad y menor reactividad, requiriendo una mayor cantidad de aire por unidad de combustible. El potencial de este nuevo combustible no fue aprovechado hasta la llegada del motor de vapor y los cilindros de soplado que permitieron la inyección de mayores cantidades de aire comprimido en los hornos. (Palacios Reparaz et al., 2002)(González Baquet, s.p.)

## 2.5. Horno de Pudelar o de Reverbero

A finales del siglo XVIII se alcanzó otro punto clave en la historia de la siderurgia, la aparición de la pudelación, que es un proceso usado en la producción de hierro forjado o acero a partir del arrabio producido en un horno alto. El horno de reverbero (Figura 4. Horno de Pudelado o Reverbero) está construido de manera que el aire caliente procedente de la combustión es arrastrado por encima del hierro sin que este se encuentre en contacto con el combustible. La principal ventaja de este sistema es la exclusión de las impurezas contenidas en el combustible del producto obtenido. El horno toma el nombre de “reverbero” en el sentido general de rebote o reflejo, no en el sentido acústico de la palabra. (Museo de la Siderurgia y la Minería de Castilla y León, s.f.)(González Baquet, s.p.)



*Figura 4. Horno de Pudelado o Reverbero (Museo de la Siderurgia y la Minería de Castilla y León, s.f.)*

El pudelado fue uno de los hitos más importantes en la historia de la siderurgia. Esto es debido a que fue uno de los primeros procesos que permitieron la producción de volúmenes considerables de hierro forjado maleable de alta calidad durante la Revolución Industrial. El hierro fundido se revolvía con barras de hierro que eran a su vez consumidas durante el proceso. Fue de los primeros procesos de producción de acero forjado en que se eliminó el uso de carbón vegetal en Europa. Se considera el inicio de la Revolución Industrial en cuanto a la industria siderúrgica. Este tipo de metal fue el utilizado en grandes obras del siglo XIX tales como la Estatua de la Libertad de Nueva York o la Torre Eiffel de París. (González Baquet, s.p.)

## 2.6. Convertidor Bessemer

En 1856, el ingeniero inglés Henry Bessemer, descubrió el soplado de la fundición líquida para la producción de acero líquido, siendo este hito el avance más importante de la historia de la siderurgia y uno de los que más han influenciado y beneficiado a la humanidad. Bessemer fue el primero que consiguió dicha producción de acero líquido en lo que fue la respuesta de la ingeniería ante una ingente demanda tras el desarrollo de la máquina de vapor durante la Revolución Industrial que demandaban mayores volúmenes de material a la vez que una mayor calidad. (World Steel Association, 2012)

El método inicial ideado por Bessemer consistía en un ventilador que soplabo aire sobre la superficie del arrabio líquido en un horno de pudelar. Esto conseguía la deseada aceleración en la oxidación del arrabio aunque era muy ineficaz. Sucesivos diseños fueron probados hasta alcanzar el que se utilizaría hasta mediados del siglo XX en la producción de acero y que es el diseño que comúnmente se conoce como Convertidor Bessemer. El nuevo diseño en cuestión contaba con un crisol donde se introducía el arrabio líquido, a través del cual se hacía pasar un chorro de aire soplado desde el fondo. Esta inyección de aire permitía la oxidación del silicio, el manganeso, el hierro y el carbono. Los óxidos de silicio, manganeso y hierro formaban silicatos complejos cuya densidad es inferior y que por lo tanto formaban la escoria que flota en la superficie del baño. La formación de estos óxidos es exotérmica y conseguía elevar la temperatura del baño de los 1.250°C a los 1.650°C, que es más que suficiente para mantener el hierro fundido durante todo el proceso. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

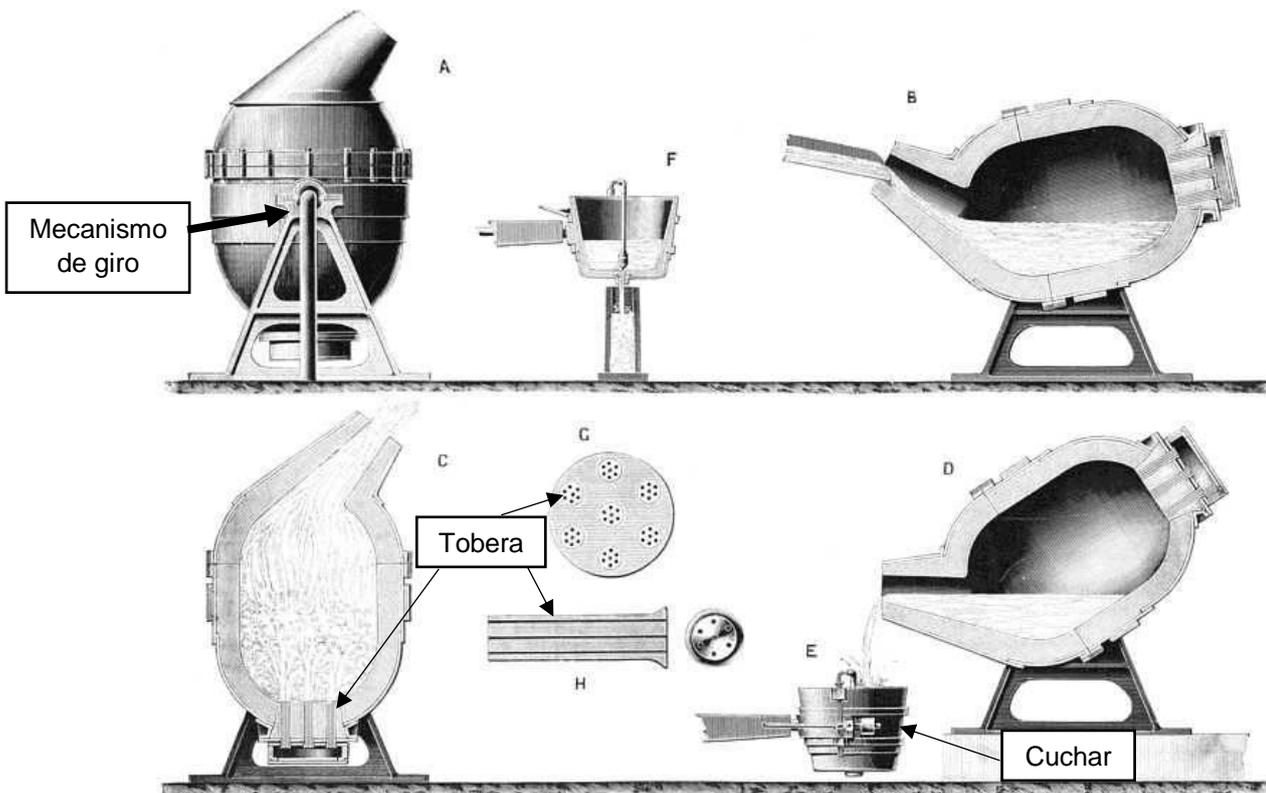


Figura 5. Convertidor Bessemer (I Love My Architect, 2010)

El proceso conseguía reducir el contenido en carbono y silicio por debajo del 0,10%, que se reflejaba en un metal forjable, resistente y tenaz. La calidad también aumentó en comparación con el producto obtenido en los hornos de reverbero. Otra de las ventajas de este proceso fue la posibilidad de producir aceros con diferentes contenidos en carbono (con contenidos entre 0,10% y 0,70%). Sin embargo el proceso también

presenta inconvenientes siendo el principal la necesidad de utilizar materias primas con bajo contenido en fósforo puesto que no se elimina durante el proceso y el material resultante es muy frágil a temperatura ambiente. El azufre tampoco es eliminado durante el proceso y era necesario monitorizar el nivel del silicio. La escasez de yacimientos de mineral de hierro con bajo contenido en fósforo alimentó la investigación y desarrollo de nuevos métodos que solucionasen estas limitaciones.(González Baquet, s.p.)(ETCF Arcelor Mittal, 2007)

## 2.7. Convertidor Thomas

Este método fue la solución utilizada por países como Francia, Alemania y Bélgica, los cuales no contaban con reservas de mineral de hierro con bajo contenido en fósforo. Otros países como Inglaterra y Suecia poseían dichos yacimientos lo que suponía una ventaja con respecto a los primeros que buscaron una solución que permitiese utilizar sus propias reservas del mineral, es decir, incluir en el proceso la eliminación del fósforo.

En los convertidores Bessemer que contaban con un revestimiento ácido, tenía lugar la oxidación del fósforo con el aire. Fue esto lo que llevó al ingeniero inglés Sydney Gilchrist Thomas a pensar que dicha impureza podría ser eliminada por combinación con escorias calcáreas (cal), sin embargo, dichas escorias destruirían el revestimiento interior típicamente de carácter ácido (sílice). Para solucionar este nuevo problema Thomas pensó en sustituir el revestimiento con material refractario de carácter básico que no sería afectado por la cal. (González Baquet, s.p.)(ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

El convertidor fue presentado en 1879. Su operación es similar al Convertidor Bessemer, diferenciando el revestimiento interior que está compuesto por cal y silicato sódico, aglomerados con arcilla. Evoluciones posteriores del Convertidor Thomas cambiaron la composición del revestimiento interior por dolomía calcinada. De esta manera se abrió la puerta a la utilización de minerales de hierro con altos niveles de fósforo cuyo uso no sería viable en un Convertidor Bessemer.

Las diferencias entre el Convertidor Thomas y el Convertidor Bessemer no están limitadas a cambios en los materiales utilizados en la construcción de su revestimiento refractario interno, sino que estos también afectan a las reacciones que tienen lugar durante el proceso de soplado. En el caso del Convertidor Thomas la reacción exotérmica que proporciona la energía térmica que asegura el estado líquido del metal es la oxidación del fósforo, mientras que en el Convertidor Bessemer era la oxidación del silicio. En el Convertidor Thomas la escoria es formada debido a la adición de escorias calcáreas (cal) al convertidor mientras que en el Convertidor Bessemer esta se

forma espontáneamente como consecuencia de los silicatos complejos formados durante las reacciones de oxidación. (ETCF Arcelor Mittal, 2007)

En el Convertidor Thomas la oxidación del carbono debe ser casi completa (alcanzar un 0,02%) para conseguir eliminar el fósforo mediante un sobreesoplado. Este último paso del proceso elimina no solo el fósforo que se combina con la cal sino también el azufre por acción de las escorias básicas.

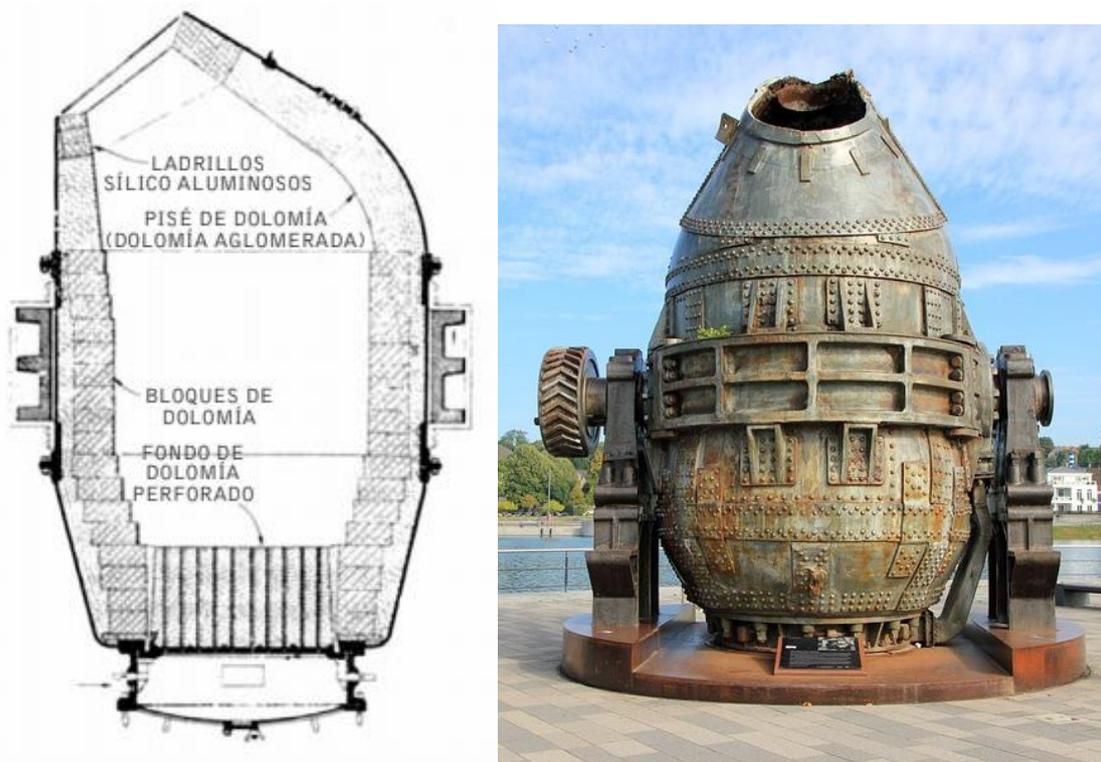


Figura 6. Convertidor Thomas (González Baquet, s.p.)

Este convertidor fue utilizado ampliamente durante el siglo XX, más que los Convertidores Bessemer, aunque hay excepciones como Estados Unidos, cuyos yacimientos de mineral de hierro son pobres en fósforo por lo que esta tecnología nunca llegó a ser implementada en dicho país.

## 2.8. Horno Siemens

Fue la tecnología más utilizada durante la primera mitad del siglo XX. Este horno se basa en la fabricación de acero a partir de chatarras de hierro, acero y fundición. Fue probado con éxito por primera vez en 1865 por el ingeniero francés Pierre-Émile Martin que produjo acero en un horno de solera al que había aplicado la tecnología de regeneradores de calor creada por el ingeniero Friedrich Siemens.

Los regeneradores consisten en dos apilados de ladrillos refractarios que trabajan alternativamente. Uno almacena calor de los humos de combustión mientras que el otro cede el calor previamente almacenado al aire que circula por su interior en dirección al horno. Este sistema permitió alcanzar temperaturas muy superiores a las que se conseguían hasta entonces (de 1.000-1.250°C a 1.650°C) y que eran más que suficiente para fundir hierro y acero. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

El hermano de F. Siemens, Carl Wilhelm Siemens, fue el que tuvo la idea de aplicar los regeneradores a la fabricación de acero. Siemens y Martin trabajaban ajenos el uno del otro. Ambos llegaron a tener ideas diferentes de como producir acero, Siemens pretendía obtener acero partiendo de fundiciones con adiciones de mineral de hierro. Martin, sin embargo, pretendía conseguir acero a partir de chatarras de hierro y fundiciones. El proceso final conocido como Proceso Martin-Siemens es una mezcla de ambos. El horno, recibió el nombre de su creador Siemens.

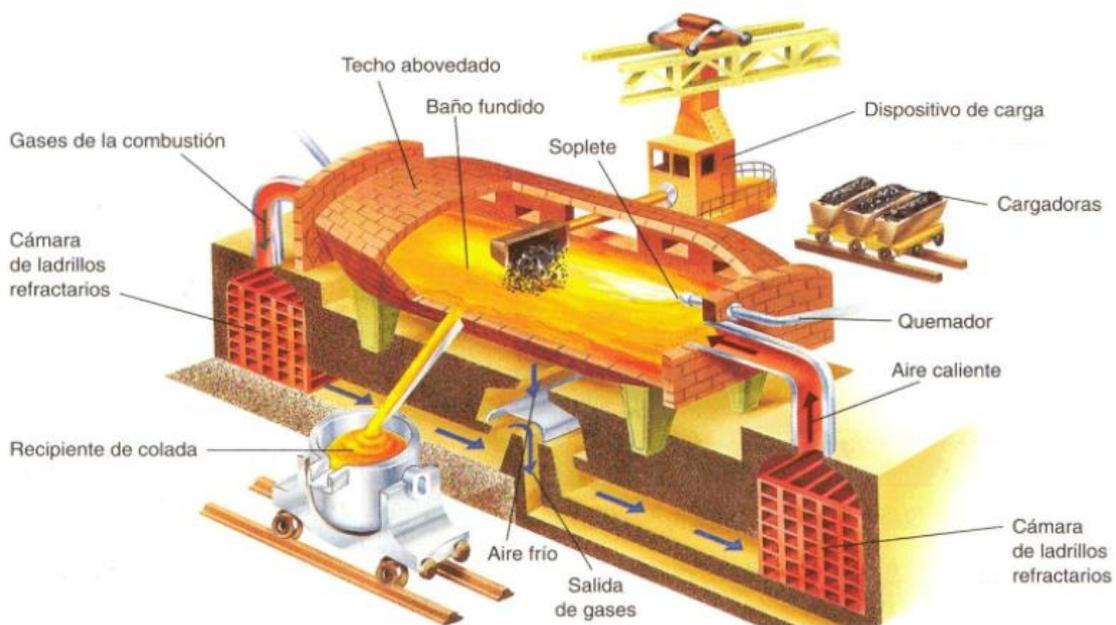
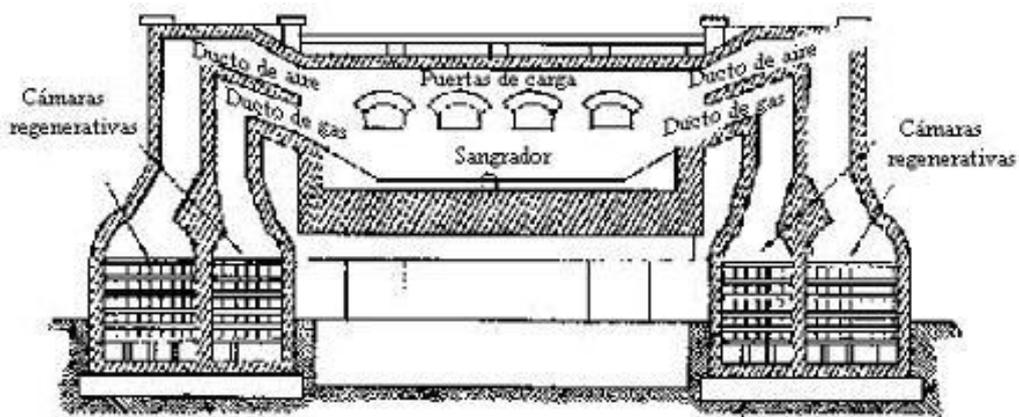


Figura 7. Horno Siemens (Villafaña, 2005)(González Baquet, s.p.)

La gran ventaja de este horno es la versatilidad que tiene para admitir cargas metálicas muy diversas. Típicamente se cargaría en una proporción de 70% chatarra y 30% fundición, aunque puede variar de fábrica dependiendo del material disponible.

El revestimiento interior del horno Siemens podía ser ácido aunque eran los casos más raros donde se utilizaban materias primas muy puras. Típicamente el revestimiento era de carácter básico. La reducción del contenido en carbono se conseguía a través de la oxidación del metal al entrar en contacto el aire con la superficie del baño, que durante el proceso hervía, lo cual favorecía más el contacto aire-baño. La escoria actúa como portadora de oxígeno durante el proceso de afino. (González Baquet, s.p.)

Dicho oxígeno proviene de la chatarra oxidada, las adiciones de mineral y el que contienen los gases que circulan. La caliza añadida produce  $\text{CO}_2$  al descomponerse. La oxidación tiene lugar a lo largo de dos etapas, la primera, el hervido del mineral, que tiene lugar tras la carga del mismo. La segunda, el hervido de la caliza, que desprende  $\text{CO}_2$  y que también oxida el carbono. Además durante el proceso se oxidan: silicio, manganeso y fósforo. También tiene lugar una pequeña eliminación de azufre gracias a la basicidad de la escoria.

### 3. La Siderurgia actual

Hoy en día se siguen dos vías para la obtención de acero, la ruta convencional de la siderurgia integral (horno alto y acería LD) y la ruta del horno eléctrico de arco las cuales son mostradas en la Figura 8 y Figura 9.

La producción en acería LD representa un 60% de la producción mundial de acero y es normalmente destinada a la fabricación de productos planos de alta calidad con requerimientos estrictos con respecto a niveles de impurezas. Este proceso será estudiado más en detalle a lo largo del trabajo, más en concreto el convertidor BOF.

En el caso de la fabricación de acero mediante el uso del horno eléctrico, se basa en la fusión de chatarra y en ocasiones prerreducidos de hierro. Este método ha crecido rápidamente en los últimos tiempos y supone un 33% de la producción mundial. En el caso de España, la siderurgia integral supone un 33% de la producción de acero nacional mientras que el horno eléctrico de arco proporciona el 67% restante.

En el convertidor BOF, que es una de las principales instalaciones de la acería LD, además de la colada continua y la metalurgia secundaria, se elimina el exceso de carbono del arrabio procedente del horno alto con el fin de lograr un contenido inferior al 2% (habitualmente  $<0,6\%$ ) para obtener acero. El acero líquido obtenido tras el soplado en el convertidor es enviado a las instalaciones de metalurgia secundaria para ajustar su composición (adición de ferroaleaciones o degasificación). También se aprovecha este proceso para la estabilización de la temperatura y la composición del producto. Para finalizar el proceso el acero es solidificado en la colada continua donde se confiere el formato al acero, productos largos de sección constante: slabs (sección rectangular) y blooms o palanquillas (sección cuadrada) son los productos más comunes. (Palacios Reparaz et al., 2002)

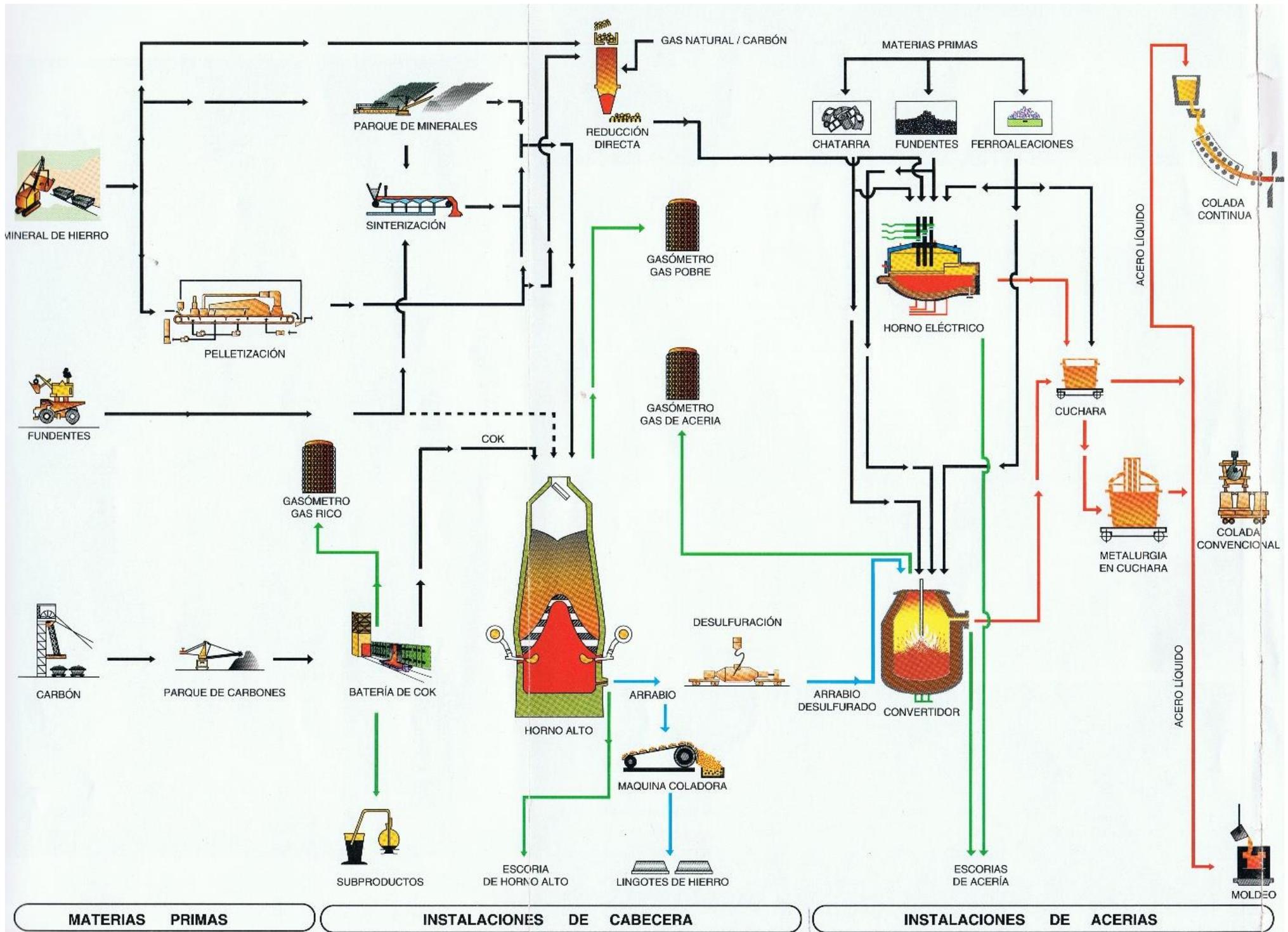


Figura 8. Diagrama de flujo del Proceso Siderúrgico (Parte I/II) (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

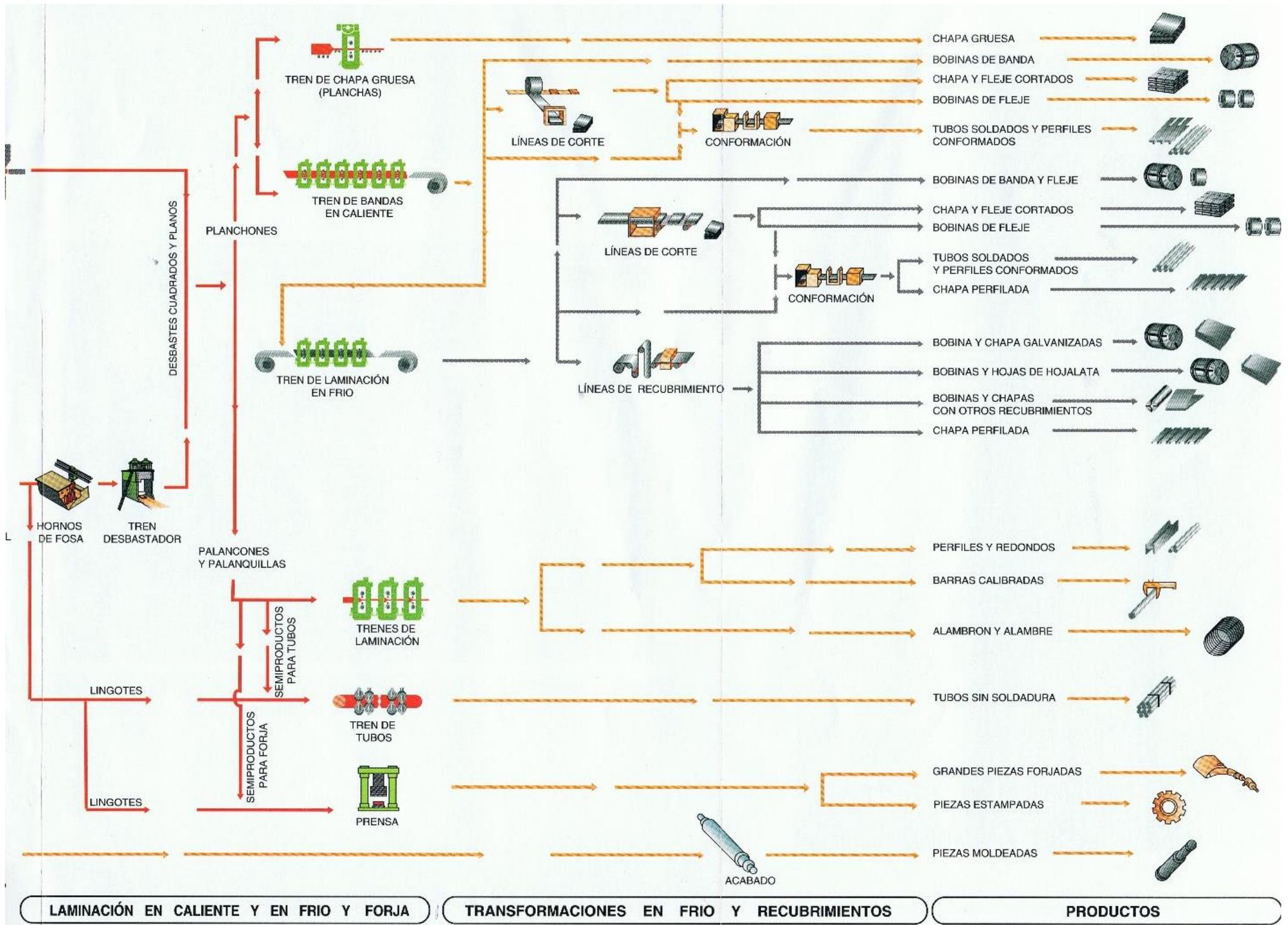


Figura 9. Diagrama de flujo del Proceso Siderúrgico (Parte III) (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

## 4. La Acería LD

El arrabio procedente del horno alto llega a la acería donde se convierte en acero, ajusta su composición de acuerdo a las necesidades del producto y se solidifica.

La definición del acero de acuerdo con la norma UNE 36-004 es, una aleación de hierro y carbono con un contenido máximo de carbono de un 2%. Materiales con contenidos en carbono superiores al 2% son llamados fundiciones, siendo el arrabio producido en el horno alto una de estas fundiciones en estado líquido cuyo contenido en carbono suele oscilar entre el 4,2% y el 4,8%.

En el acero no solo se encuentran presentes el hierro y el carbono sino que también es posible encontrar manganeso, silicio, aluminio, cromo o níquel que modifican las propiedades del material. A su vez, es posible encontrar impurezas no deseadas que perjudican el comportamiento del acero como por ejemplo el azufre o el fósforo, las cuales como se verá más adelante son reducidas a lo largo del proceso por debajo de ciertos niveles aceptables.

Gracias a la posibilidad de variar la composición del acero, tanto su porcentaje en carbono como las adiciones mencionadas en el párrafo anterior y que influyen sobre sus propiedades, ha permitido la creación de un amplio rango de aceros que cumplen con muy diversos cometidos para los cuales se modifican sus propiedades para optimizar su rendimiento en cada caso. Como ejemplo el contenido en carbono afecta a la dureza del metal, siendo aquellos aceros con muy bajo contenido en carbono (cerca de un 0,05%) más blandos y utilizados en actividades que requieren gran maleabilidad y pequeña dureza como la estampación y aquellos con mayores contenidos en carbono (cerca de un 0,8%) más duros y utilizados en actividades donde la deformación no importa como en la fabricación de carril. (Palacios Reparaz et al., 2002)

El proceso de conversión del arrabio a acero también es conocido como afino. El método actual más utilizado y que se estudiará en detalle a continuación es el proceso LD, que utiliza un convertidor de oxígeno básico también llamado convertidor soplado por oxígeno (convertidor BOF). Su uso comenzó a extenderse durante la segunda mitad del siglo XX. El ingeniero suizo Robert Durrer fabricó acero utilizando este método por primera vez en 1948 aunque la primera colada experimental no fue realizada hasta 1949 en la ciudad austriaca de Linz, el proceso toma su nombre de estas iniciales, proceso Linz-Durrer (proceso LD) aunque con los años se ha reinterpretado como las iniciales de las 2 primeras ciudades que construyeron este tipo de convertidor Linz-Donawitz.

El proceso consiste en la inyección de un chorro de oxígeno puro a gran velocidad sobre el baño de arrabio utilizando una lanza que se introduce por la boca del convertidor.

La gran cantidad de ventajas ofrecidas por esta tecnología fue el detonante que produjo su rápida expansión. El proceso LD permite obtener mejores calidades de acero que sus predecesores (Bessemer y Thomas). El tiempo del proceso de la colada es muy inferior a otros métodos, de unos 30 minutos en el caso del proceso LD, unas 5-6 horas en el método Siemens y unas 2 horas en el horno eléctrico. El proceso LD permite la utilización de chatarras, lo que permite el reciclaje de material defectuoso de la propia fábrica, hierro recuperado de las escorias, etc.

#### 4.1. Instalaciones

Una de las instalaciones que primero entran en juego durante el proceso de producción de acero, es el parque de chatarra, donde se almacena y clasifica la chatarra que se añadirá al arrabio en el convertidor.

Para proporcionar un mejor sentido de la localización de las diferentes instalaciones que se encuentran en la nave de convertidores, se presenta un esquema de la misma en la Figura 10.

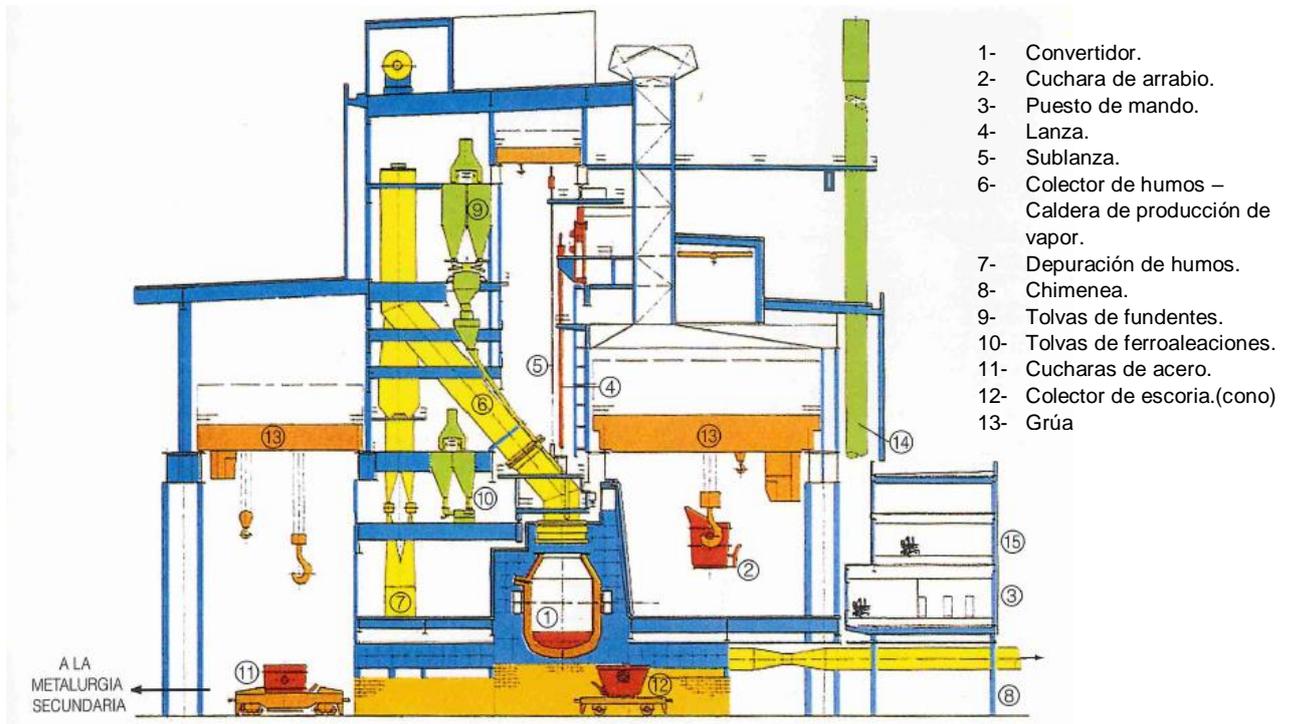


Figura 10. Instalaciones de la Acería LD (González, 2015)

En la parte superior de la nave de convertidores se encuentran todos los equipos encargados de los fundentes y las ferroaleaciones (sistemas de almacenamiento,

manipulación, transporte, pesaje, etc.). Como su nombre indica, los convertidores también se encuentran en esta nave. En la nave de colada se encuentran las cucharas de acero y de escoria junto con sus respectivos equipos de reparación. Una vez sangrado el convertidor, el acero fundido es transportado en cucharas a las instalaciones de metalurgia secundaria y colada continua.

Los gases de salida del convertidor son canalizados para evitar la contaminación de la nave y los alrededores. Además son depurados y dado que su temperatura de salida es de unos 1.700°C también se aprovecha esa energía para mejorar la eficiencia total del proceso. A continuación estos gases pasan a ser almacenados para su uso posterior como combustible en distintas instalaciones de la planta. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

A continuación se estudian en más detalle los principales equipos e instalaciones de la acería.

#### 4.1.1. Cuchara

La cuchara es usada varias veces a lo largo del proceso, aunque en este caso se centra en el proceso de afinado dado que es el primer momento en que se utiliza.

Es un recipiente de grandes dimensiones, sus paredes están hechas de acero recubierto por material refractario. Cuenta con 2 salientes laterales que sirven para poder suspenderla o apoyarla. Para poder abatir la cuchara y vaciar su contenido también cuenta con un asa abatible.

Dependiendo de la función que cumple existen dos tipos de cuchara.

La cuchara de arrabio es la encargada de la recogida del arrabio procedente del horno alto. La boca tiene una forma especial, similar a un embudo seccionado a la mitad para facilitar el vertido del arrabio a través de la boca del convertidor como se puede observar en la Figura 11.

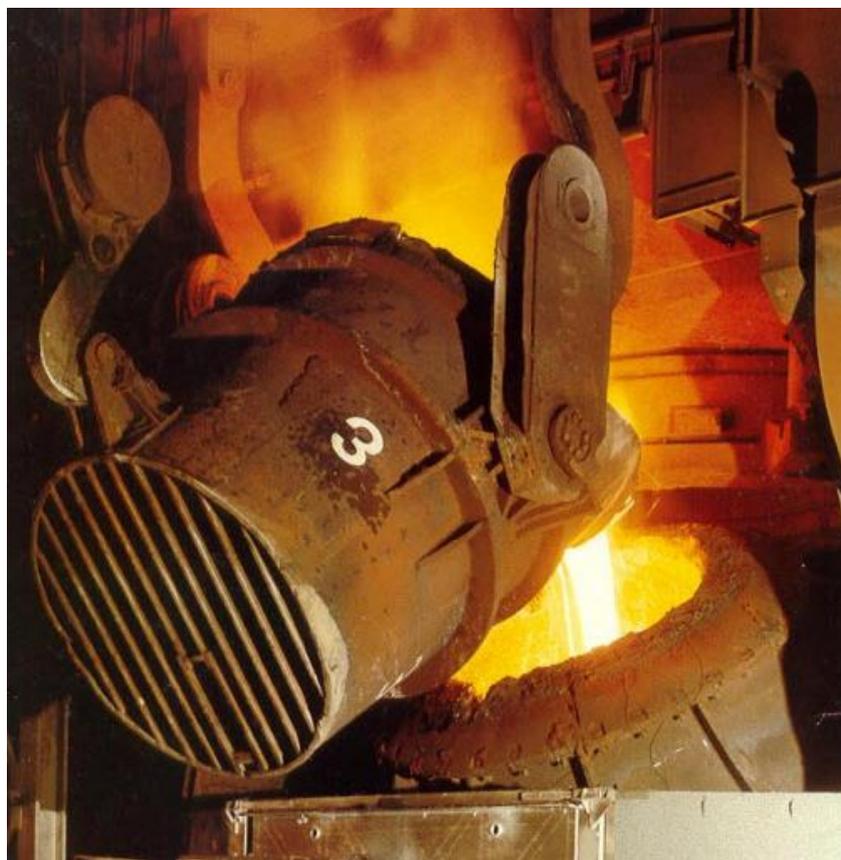
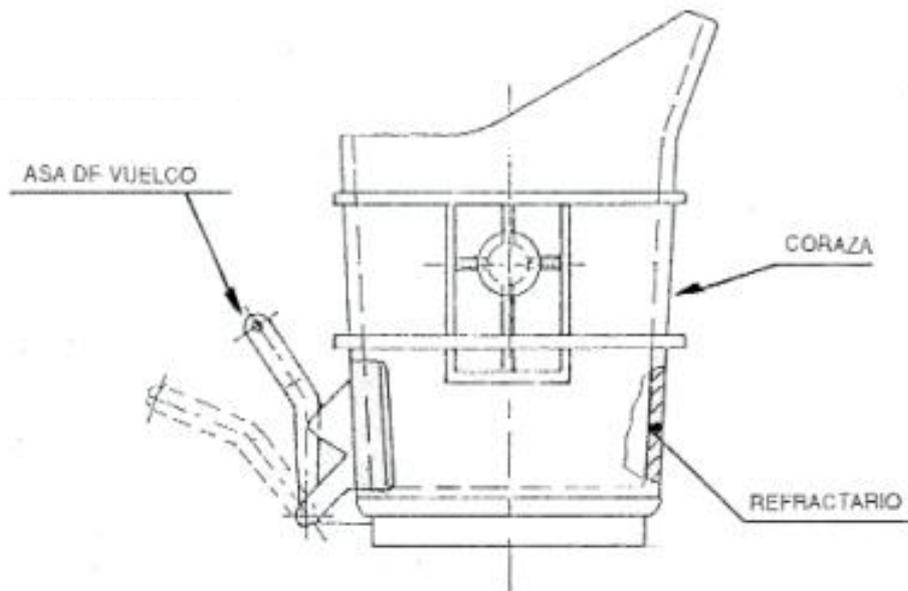


Figura 11. Cuchara de Arrabio(ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)(Chinarailcart.com, 2014)

La cuchara de acero es la cuchara donde se sangra el acero desde el convertidor BOF y que se encarga de contener el acero líquido durante su transporte hacia la metalurgia secundaria. En el caso de las cucharas de acero, cuentan con un orificio en el fondo de la cuchara para la salida del acero que se conoce como buza de cuchara o tubo LSA

(Ladle Shroud Argon) y su sistema de cierre mediante placas deslizantes como se observa en la imagen izquierda de la Figura 12. Además en el fondo de la cuchara también existen zonas de refractario poroso por donde se inyectan gases inertes usados para la homogeneización del acero en la metalurgia secundaria que ayudan al proceso.(ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

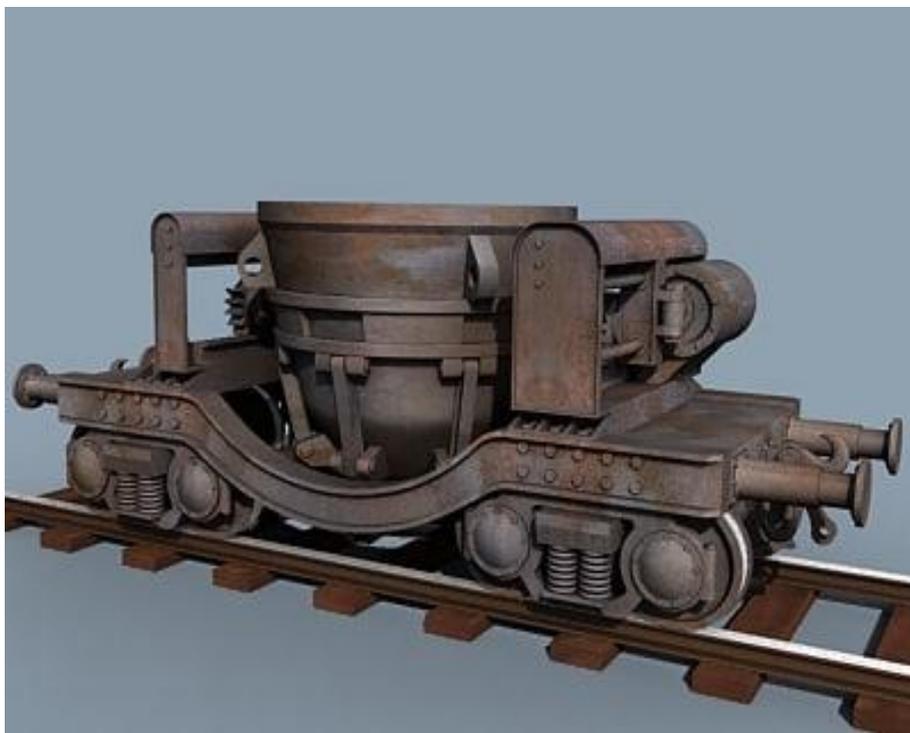
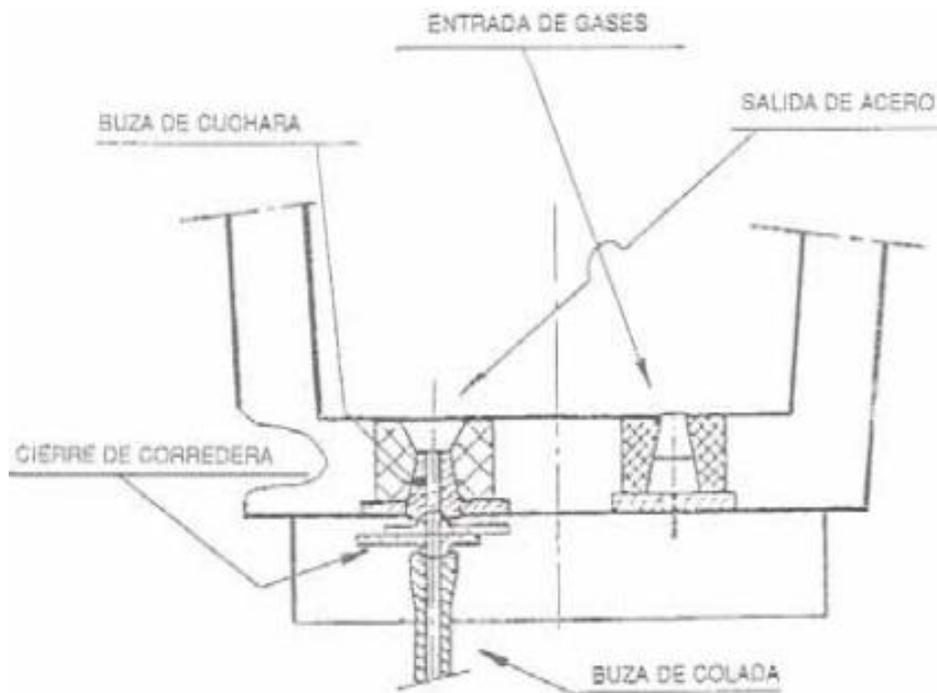


Figura 12. Cuchara de Acero. Izda. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007) dcha. (STLfinder, 2018)

#### 4.1.2. El convertidor LD

Su diseño actual ha experimentado cambios con respecto a los convertidores LD iniciales, los cuales, al igual que los convertidores Bessemer tenían la boca descentrada con el objetivo de facilitar la extracción de la escoria aunque con el tiempo se observó que dicha disposición no era necesaria. El cambio a una boca centrada facilitó la operación de la lanza de soplado. El perfil de los primeros convertidores LD tenía forma de pera mientras que los construidos en la actualidad cuentan con una parte troncónica superior, una parte central cilíndrica y la parte inferior de nuevo troncónica siendo el fondo esférico. La comentada distribución se muestra en la Figura 13.

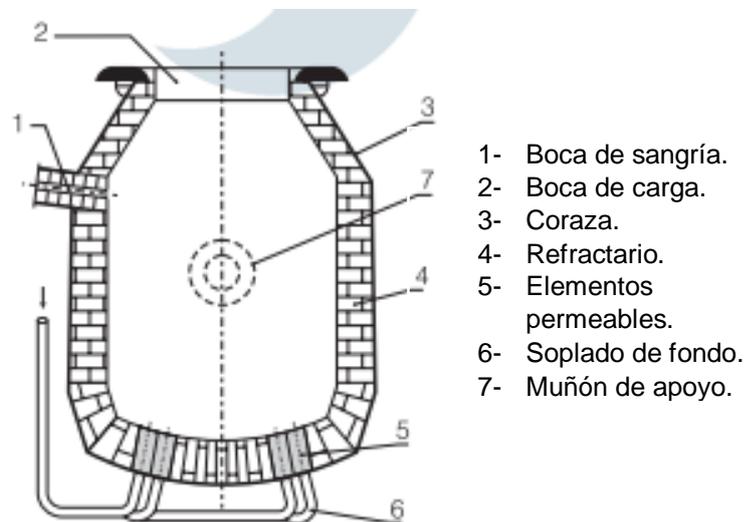


Figura 13. Sección de un Convertidor LD. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007).

La boca de carga, elemento 2 de la Figura 13, como su nombre sugiere es utilizada para realizar la carga de la chatarra, el arrabio procedente de las cucharas, los fundentes, etc. El elemento 1 de la Figura 13, la boca de sangría, es usada para colar el acero una vez el proceso del convertidor ha sido completado, su diseño pretende dejar pasar el acero y una mínima cantidad de escoria cuyo objetivo es evitar una oxidación del acero cuando se encuentra en la cuchara durante el resto del proceso en la acería. (Palacios Reparaz et al., 2002)

Como se puede observar, para realizar la colada, utilizando la boca de sangría, el convertidor debe ser inclinado, parte en la que entran en juego los muñones de apoyo que basculan el convertidor el ángulo necesario para verter el acero líquido en la cuchara de acero que lo llevará a las instalaciones de metalurgia secundaria y de colada

continua. Los muñones de apoyo también son utilizados durante la fase de carga donde inclinan el convertidor para facilitar la carga de los diferentes materiales.

#### 4.1.3. Revestimiento Refractario del Convertidor LD.

Debido a las condiciones extremas de trabajo a las que se somete el interior del convertidor, donde las temperaturas superan los 1.700°C, el revestimiento interior es una parte clave del diseño de este equipo. Debido a estas temperaturas es necesario el uso de materiales refractarios cuyo punto de fusión se encuentre ampliamente por encima de dicha temperatura y que además sean lo suficientemente resistentes a la corrosión durante sucesivas coladas. Otro factor a tener en cuenta es la resistencia al impacto, esta es mayor durante la etapa de carga del convertidor especialmente cuando se introduce la chatarra y debe ser tenido en cuenta a la hora de diseñar la zona de impacto. (Barker et al., 1998)

Dado que el refractario es la superficie que se encuentra directamente en contacto con el baño por lo que debe ser químicamente resistente al ambiente creado en el interior del convertidor, esto significa ser de carácter básico debido a que la escoria del convertidor es de carácter básico (principalmente cal) y si fuese de carácter ácido se degradaría muy rápidamente. El principal objetivo del proceso es el de la oxidación del carbono y por tanto es muy oxidante por lo que el refractario también debe ser resistente a la oxidación.

El material típico usado en la actualidad son ladrillos refractarios de magnesia de un 96-98% de pureza y una porosidad de un 12%. Como se mencionó anteriormente el refractario debe durar durante un periodo de tiempo largo aunque depende de las características de la carga del convertidor. Es posible extender la vida del mismo si los fundentes usados en la carga contienen altos niveles de magnesia puesto que si el baño está saturado en este componente, la escoria no atacará el revestimiento. Si se consigue el revestimiento puede soportar más de 2000 coladas. (ETCF Arcelor Mittal Avilés, 2007)

Para conseguir prolongar la vida del refractario, se utiliza dolomía enriquecida en magnesia para elevar sus niveles evitar la degradación del revestimiento. La dolomía es usada por su competitividad económica con respecto a la magnesia pura aunque su contrapartida es su rápida hidratación en contacto con la atmósfera, causando su degradación.

Los espesores típicamente usados para revestir el interior del convertidor varían entre los 550 y los 800 mm y como ha sido mencionado al principio, es necesario tener en

cuenta el exceso de abrasión que sufre la zona donde impactan los materiales durante la etapa de carga del convertidor, donde se tiende a tener un espesor mayor para conseguir un desgaste uniforme en todo el convertidor. Zonas de especial interés son la zona de desescoriado y la de muñones.

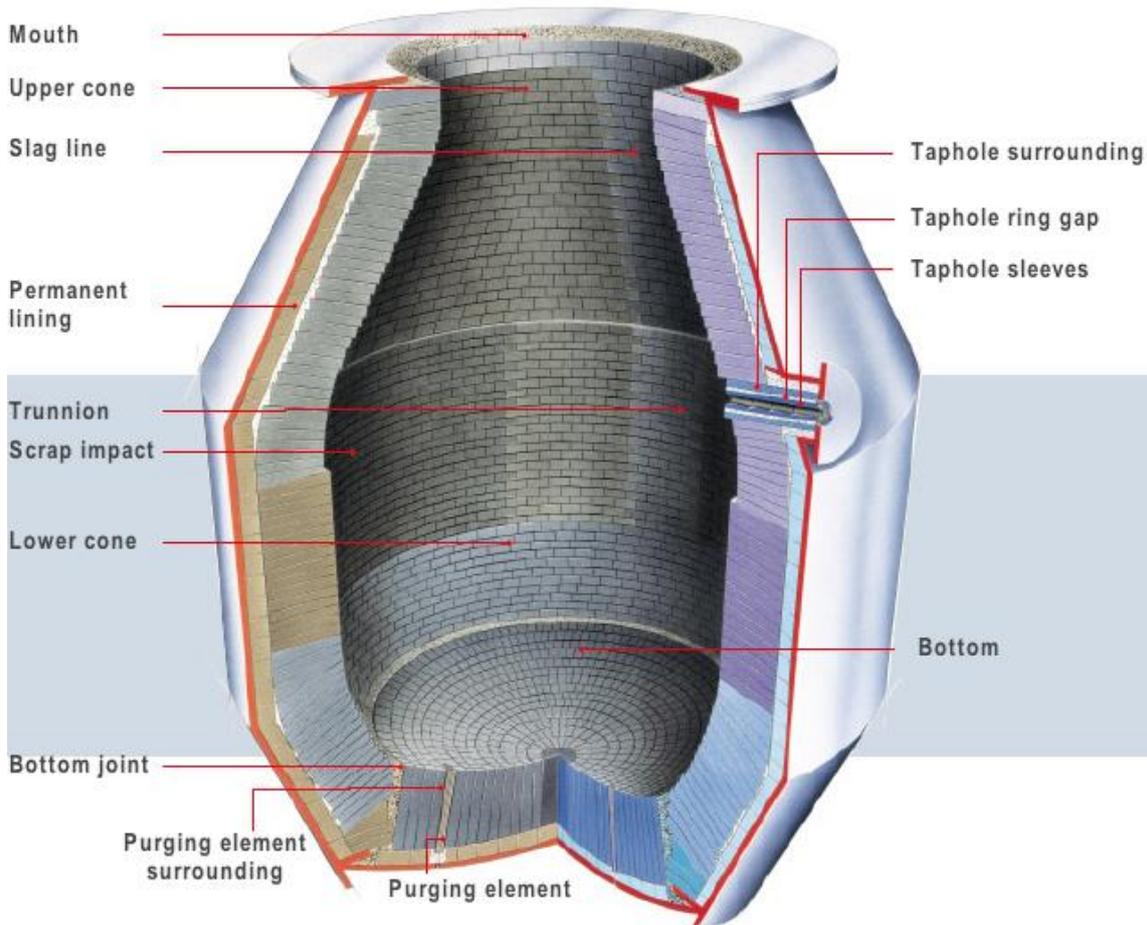


Figura 14. Refractario del Convertidor LD. (Amoss, 2010)

#### 4.1.4. Lanza de inyección de oxígeno

La lanza se encarga de la inyección de oxígeno puro (>99% pureza) sobre el baño metálico para oxidar el carbono presente en el mismo y de esa manera producir acero líquido partiendo del arrabio, que como ya se ha mencionado es una fundición líquida. Esta inyección dura unos 17 minutos y la proximidad de lanza a la superficie de la escoria que flota en la superficie varía entre 90 y 300 cm. La presión también es variable y normalmente se encuentra en el intervalo 10-30 atm. El caudal de oxígeno inyectado es otra variable que debe ser determinada. (ETCF Arcelor Mittal Avilés, 2007)

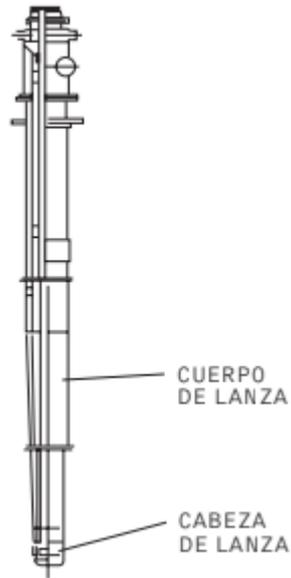


Figura 15. Lanza de Inyección de Oxígeno. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007).

La lanza está compuesta por un tubo de doble hueco (Figura 15) por el que circulan el oxígeno que es inyectado en el convertidor y agua para refrigerar la lanza. La parte inferior de la lanza se conoce como cabeza de lanza y puede tener diferentes configuraciones con más o menos toberas (entre 3 y 6) para la inyección de oxígeno como se muestra en la Figura 16.

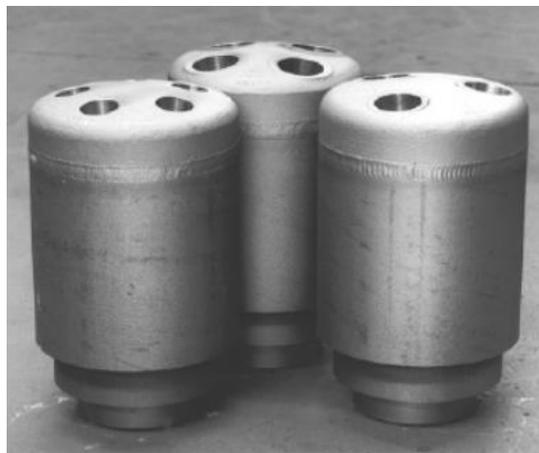


Figura 16. Cabezas de Lanza de Inyección de Oxígeno. (Barker et al., 1998).

La lanza se encuentra acoplada a un sistema que permite su desplazamiento tanto vertical como horizontal, con dos velocidades diferentes. Cuenta con un sistema de seguridad para evitar la caída de la lanza al baño y también un método de extracción rápida en caso de accidente.

Existen numerosos factores que afectan el rendimiento de la lanza como por ejemplo la cantidad de sílice fundida en el baño metálico, puesto que afecta la cantidad de escoria formada, la cual tiene que ser atravesada por el chorro de oxígeno inyectado. Esto puede significar una reducción del rendimiento de la lanza además de un aumento en las salpicaduras dentro del convertidor. La altura de la lanza es un factor muy importante durante los cálculos de la cabeza de lanza, esto es debido a que una altura muy baja (la lanza está muy próxima al baño) puede provocar la fusión de la lanza o el mal funcionamiento prematuro de esta. Una altura demasiado grande significará una reducción en la velocidad de oxidación del carbono, lo cual ralentiza todo el proceso además de incrementar la cantidad de oxígeno necesaria. (Barker et al., 1998)

Los convertidores cuentan con dos lanzas, normalmente una se encuentra lista para su uso en caso de fallo de la primera. En ciertas fábricas las lanzas se utilizan alternativamente. En caso de fallo el cambio de lanza es un cambio relativamente rápido, de unos cinco minutos.

A lo largo de las últimas décadas, ha surgido un nuevo diseño de lanza que incluye una inyección de oxígeno en la zona de post combustión. La idea de esta inyección de oxígeno es la de combinarlo con los gases procedentes de la oxidación del baño metálico cuya composición es en su mayoría CO (~90%) y cuya reacción con oxígeno es altamente exotérmica, lo cual revierte sobre el proceso en forma de energía térmica. Es principalmente usado en fábricas norteamericanas. La lanza consta en este caso de dos conductos y dos salidas para la inyección de oxígeno. El suministro principal sigue siendo hacia la cabeza de lanza como en las lanzas tradicionales para impactar sobre la superficie del baño metálico, el suministro auxiliar se controla por separado y como se aprecia en la Figura 17 es inyectada a una altura superior dentro del convertidor. La función principal del suministro auxiliar de oxígeno es la de reaccionar con el monóxido de carbono procedente de las reacciones del baño para producir calor que puede destinarse a la fusión de más chatarra además de ayudar a reducir las adhesiones de impurezas en la boca de carga del convertidor y la lanza. (Barker et al., 1998)

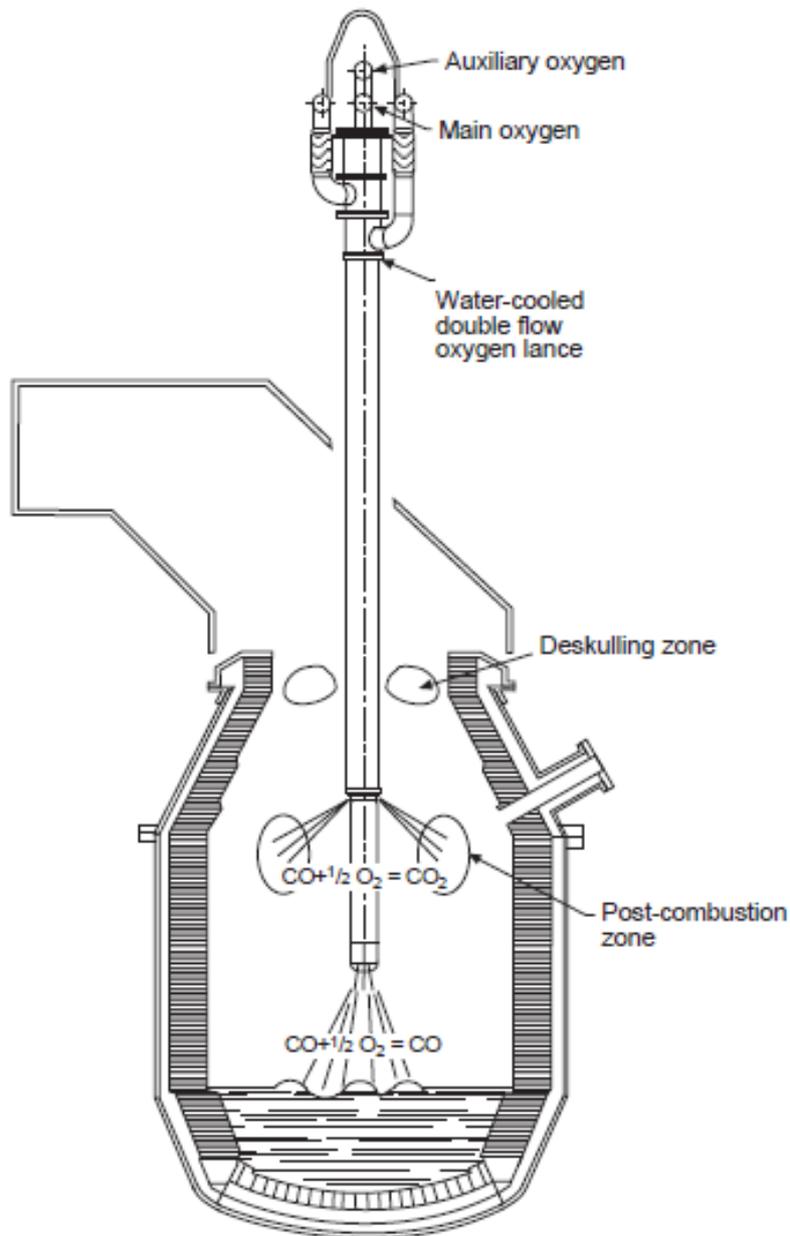


Figura 17. Lanza con inyección de oxígeno en zona de post-combustión (Barker et al., 1998)

También se ha comenzado a utilizar lanzas de oxígeno para cubrir la superficie interna del convertidor con una capa de escoria protectora con altos niveles de MgO (Figura 18). Este proceso se realiza una vez se ha colado el acero pero todavía hay escoria en el convertidor, en este momento se vuelve a utilizar la lanza pero no para inyectar oxígeno, sino nitrógeno. La lanza se coloca entre 0,6 y 1,2 metros sobre el fondo del convertidor y a continuación se inyecta nitrógeno que provoca que la escoria salpique toda la pared interna del convertidor cubriendo el refractario. La utilización de este método ha incrementado la vida típica del refractario de 3000 coladas a más de 20.000. También reduce en gran medida las reparaciones necesarias que se realizan con gunitado en el refractario. (Barker et al., 1998)

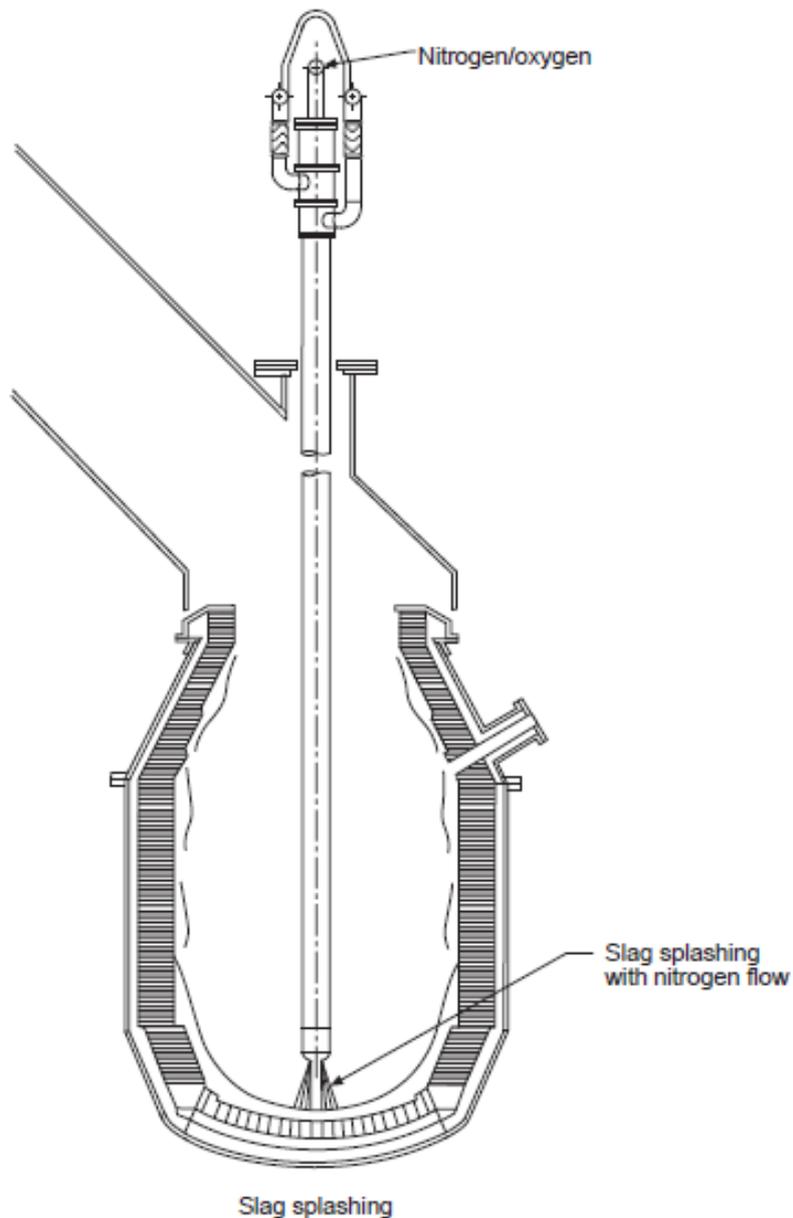


Figura 18. Salpicado de escoria por inyección de nitrógeno. (Barker et al., 1998)

#### 4.1.5. Sublanza

La sublanza es un instrumento de monitorización usado en el modelo de control dinámico del convertidor que ayuda a mejorar la productividad, la calidad y el coste del acero.

La sublanza permite realizar análisis tanto de temperatura como químicos que revelan los niveles de carbono casi instantáneamente mediante la extracción de una muestra del baño donde la sublanza es introducida en puntos clave del proceso. También es posible conocer el nivel del baño utilizando la sublanza. Gracias a este avance el

proceso no tiene que ser detenido como se tenía que hacer anteriormente mejorando la producción y los costes. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

Al igual que la lanza, la sublanza está refrigerada con agua y se introduce en el convertidor a través de un orificio en la caldera móvil conocido como “domo de la sublanza”.

## 4.2. Materiales presentes en el Convertidor LD

A continuación se detallan brevemente los diferentes materiales, que constituyen la carga de un convertidor y que toman parte durante la conversión.

### 4.2.1. Arrabio

Es el producto obtenido en el horno alto y la principal materia prima que se convertirá en acero. Principalmente se compone de hierro y suele presentar entre un 4% y un 4,8% de carbono además de pequeñas proporciones de otros elementos que se encuentran presentes en las materias primas utilizadas en el horno alto para su fabricación como pueden ser silicio, azufre, fósforo y manganeso. El proceso del horno alto solo permite el contenido en silicio, manganeso y azufre, el resto de impurezas se hallan a merced de sus proporciones en las materias primas utilizadas en cada carga. (Barker et al., 1998)

Este arrabio pasa por la acería para reducir su contenido en carbono por debajo del 1% y ajustarlo a las necesidades del cliente dado que como se ha mencionado anteriormente sus propiedades son muy superiores a las de las fundiciones, especialmente cuando se requiere maleabilidad y tenacidad.

La composición del arrabio debe situarse dentro de unos límites que permiten un correcto funcionamiento del proceso que ocurre en el convertidor porque los elementos presentes influyen sobre los parámetros de diseño del mismo y pueden afectar el resultado final. El silicio afecta la temperatura del baño metálico debido a su efecto termógeno además de poseer gran influencia sobre la creación de escoria. El manganeso influye sobre la eliminación del azufre y el fósforo además de la formación de escoria.

Antes de llegar a la acería el arrabio pasa por la desulfuradora y se transporta en cucharas torpedo de entre 150t y 400t que habitualmente se encuentran instaladas sobre vagones. Cuando los torpedos llegan a la acería el arrabio es transferido a las cucharas de arrabio que lo cargan en el convertidor. Los torpedos son enviados a la

estación de desescoriado, parte importante para conseguir un buen vaciado en su próximo trabajo además de obtener un tipo de chatarra que se puede utilizar como parte de la carga en el convertidor, también los excedentes de producción del horno alto que han sido vaciados pueden ser usados como chatarra en la carga del convertidor. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

Esta cantidad de arrabio en forma de chatarra se añade en función de la temperatura del arrabio, de su composición, existencias y del grado de acero que se va a fabricar. Como valor medio se utilizan unos 40 kg de este tipo de chatarra por tonelada de arrabio líquido. El arrabio llega al convertidor a unos 1.330°C y se utilizan entre 865 y 950 kg de arrabio por tonelada de acero (puede variar entre fábricas). (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

#### 4.2.2. Chatarra

Está formada por piezas de acero que han completado su vida útil por diferentes razones, recortes, restos, despuntes o material defectuoso de los procesos de la propia acería. El acero que se recicla para la chatarra del convertidor debe de pasar un tratamiento durante el cual se refunde para luego ser sometidas a un tratamiento químico.

Los dos principales tipos de chatarra son, aquellas piezas procedentes de la propia acería, es decir, recortes, despuntes, slabs, chapas y bobinas defectuosas. La segunda que es de calidad inferior debido a que su composición suele ser muy diversa, es la obtenida externamente a la fábrica, procedente de desguaces. Toda la chatarra debe estar libre de elementos que no son propios como plásticos, pinturas, grasas, metales pesados, etc. Además evidentemente no debe contener elementos perjudiciales para el acero. Ciertos elementos no se eliminan durante el proceso de oxidación en el convertidor, además la cantidad de alguno de estos elementos puede estar limitada por requerimientos del acero fabricado por lo que el uso de esta chatarra puede significar superar dichos límites y por lo tanto fabricar acero no apto.

El tamaño de la chatarra es también importante, trozos muy grandes provocarán impactos muy grandes que pueden dañar los ladrillos refractarios como ya se mencionó en la sección 4.1.3, además estos trozos tardarán más en fundirse pudiendo crear errores en la composición y en la temperatura final.

La chatarra es utilizada a modo de refrigerante para el alcance de la temperatura final de soplado deseada. La cantidad utilizada depende de una serie de parámetros entre los que se encuentra la propia temperatura y composición del arrabio.

La chatarra se clasifica en función de su origen en tres clases. Chatarra circulante, procedente de la fabricación y tratamiento del acero. Chatarra de proceso, procedente de clientes o de la manufactura y acabado de productos. Por último está la chatarra de capital, obtenida en desguaces y que proviene de productos y equipos manufacturados cuya vida útil ha finalizado.

Como se ha mencionado anteriormente, la chatarra se almacena y clasifica en el parque de chatarras. Esta es preparada mediante el uso de puentes-grúa con electroimán que van depositando en básculas la chatarra necesaria de los diferentes tipos para las coladas.

#### 4.2.3. Mineral del Hierro.

Al igual que en el horno alto, en el convertidor se carga mineral de hierro (óxidos de hierro con impurezas). También puede utilizarse sínter (aglomerado de fino de mineral de hierro). Al igual que la chatarra actúa como refrigerante además de aportar hierro al baño. Se utilizan unos 8 kg de mineral por tonelada de acero líquido producido.

Este mineral debe contener bajos niveles de fósforo y de azufre puesto son elementos difícilmente eliminables. Por el contrario el manganeso es ocasionalmente utilizado para la desulfuración.

#### 4.2.4. Fundentes.

Su misión es la formación de escoria para la correcta realización del afino. Esta escoria es la encargada de atrapar las impurezas que se encuentran en el baño y evitar que acaben en la composición del acero. Como se ha mencionado la escoria es un conjunto de óxidos cuya densidad es menor que la del acero y por tanto una vez se forman ascienden a la superficie del baño.

También se encargan de rebajar el punto de fusión de la escoria para permitir que todas las reacciones entre la escoria y el acero puedan seguir ocurriendo y las impurezas puedan ser absorbidas, además de facilitar la penetración del oxígeno inyectado por la lanza.

Para alimentar los fundentes, se cuenta con equipos de manipulación, almacenaje y consumo. Existen tres zonas diferenciadas, las tolvas receptoras, es el punto donde los fundentes llegan a la acería y se reciben (llegan por camión o vagón). De aquí se envían a las tolvas clasificadoras por medio de un sistema de cintas transportadoras, donde los fundentes se pesan y clasifican. El último paso son las tolvas diarias que se

encuentran dentro de la acería y que se encargan de almacenar el material que será cargado en los convertidores.

Los principales fundentes que se utilizan en el convertidor BOF son (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007):

- La **caliza**, o carbonato cálcico,  $\text{CaCO}_3$ , calcinándola se obtiene cal y  $\text{CO}_2$ . Su función es el suministro de cal y también actúa como refrigerante.



- La **cal**,  $\text{CaO}$ , facilita la captación de impurezas en la escoria además de contribuir a su basicidad. Se combina con silicio, azufre y fósforo además de ayudar en la protección química del refractario. La cal debe cumplir unos requisitos para que actúe con un buen rendimiento, debe estar completamente calcinada para que los cálculos no se vean afectados y el proceso se desarrolle según se ha diseñado, (puede provocar desajustes en la temperatura). Su contenido en azufre,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{MgO}$  debe ser bajo, especialmente el nivel de azufre. Su granulometría debe ser controlada puesto que los tamaños extremos pueden provocar problemas durante el proceso. Por último debe tener un buen nivel de reactividad.
- La **dolomía**,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , al calcinarse forma caliza y carbonato magnésico que a su vez se descomponen formando cal y magnesia (óxido de magnesio). La dolomía se utiliza para aumentar el contenido de  $\text{MgO}$  en el convertidor y evitar que el refractario sea atacado y de esta manera prolongar su vida útil. Debido a que la dolomía también aporta cal es utilizada como refrigerante.
- El **espato flúor**, o fluoruro cálcico,  $\text{F}_2\text{Ca}$ , es utilizado en la fluidificación de la escoria mejorando su reactividad debido a una disminución de la viscosidad. Su uso se ve limitado porque causa la degradación del refractario. El espato flúor es utilizado en mayor medida cuando el acero tiene alto contenido en carbono, esto se debe a que el contenido en la escoria de  $\text{FeO}$  es más bajo y este último componente también actúa como fluidificante de la escoria. Casi no es utilizado actualmente por la ya mencionada degradación del refractario además de restricciones legales.
- El **guijo**, casi completamente formado por  $\text{SiO}_2$  (~ 94%) es utilizado si el contenido en silicio no es suficiente para alcanzar el nivel de sílice deseado para formar una buena escoria.
- Las **escorias de convertidor BOF**, una vez trituradas y procesadas (granulometrías de 19-50 mm) son usadas por su contenido en cal (40-50%) para

la formación de escoria en el convertidor, además de la fluidificación de la escoria como sustituto del espato flúor.

#### 4.2.5. Ferroaleaciones

Son aleaciones de hierro con diferentes elementos utilizadas para conferir diferentes características al acero en función de las propiedades que deseen ser obtenidas. Se suelen añadir al acero en la cuchara de acero, preferentemente durante la sangría del convertidor o posteriormente en las instalaciones de metalurgia secundaria.

Las más comunes son ferro-manganeso, ferro-silicio, ferro-sílico-manganeso, ferro-aluminio y el aluminio (desoxidante, no aleación de hierro).

Las ferroaleaciones siguen el mismo proceso de manipulación que los fundentes, son recibidos en la zona de tolvas receptoras, de ahí pasan a las tolvas clasificadoras, a continuación se envían a las tolvas diarias y en el caso de las ferroaleaciones pueden ser enviadas bien al convertidor o a las instalaciones de metalurgia secundaria.

#### 4.2.6. Oxígeno

Se usa para oxidar los elementos que se encuentran mezclados con el hierro del arrabio. Es inyectado a velocidad supersónica sobre el baño mediante el uso de la lanza (sección 4.1.4) y debe ser capaz de atravesar la escoria y penetrar suficientemente en el baño metálico para conseguir una buena oxidación mediante el contacto y la agitación del baño.

La pureza debe ser casi perfecta, superior al 99,99%, para no inyectar nitrógeno en el baño. La manera en que el oxígeno se inyecta (esquema o patrón de soplado) es particular de cada acero y de cada convertidor, además de variar en función del tipo de cabeza de lanza, dado que en función de los agujeros se cubre diferente superficie y el ángulo de ataque sobre la superficie varía. El consumo de oxígeno en un convertidor BOF varía entre 50 y 60 Nm<sup>3</sup> por tonelada de acero. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

#### 4.2.7. Gases Inertes

No intervienen en las reacciones de afino. Ejemplos de este tipo de gas son el nitrógeno y el argón. Se inyectan desde el fondo del convertidor (proceso LBE) para aumentar la agitación y como consecuente la reactividad de la mezcla al crear corrientes ascendentes que a su vez mejoran la transferencia de impurezas a la escoria. Con la

inyección de estos gases se consigue si no eliminar, reducir en gran medida las zonas de baja agitación homogeneizando la mezcla y aumentando la velocidad con que se oxida el carbono.

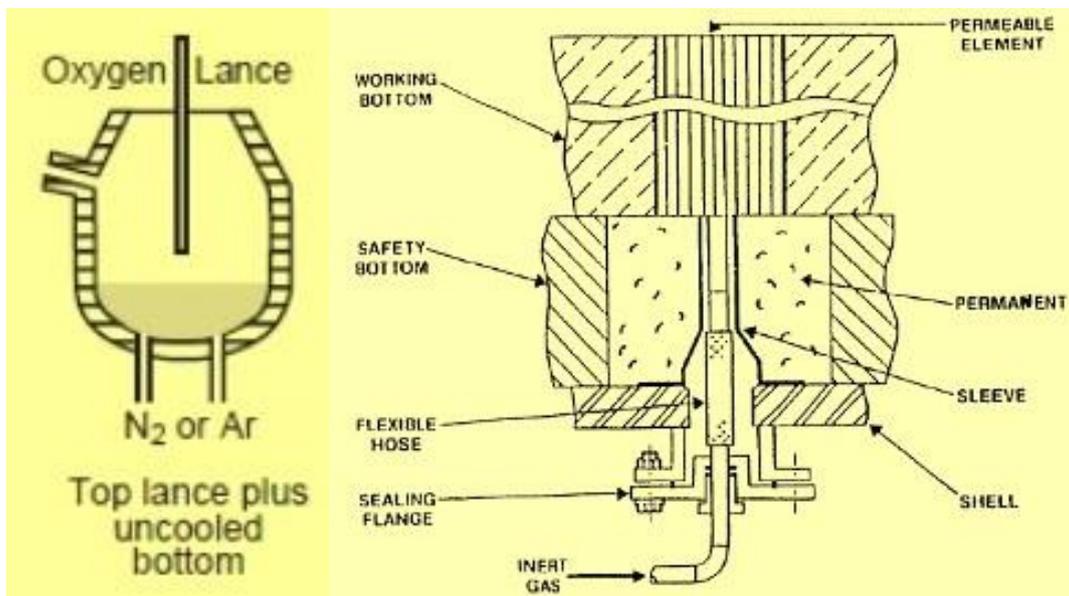


Figura 19. Inyector de gases inertes por el fondo del Convertidor LD.

### 4.3. Operación del Convertidor LD

#### 4.3.1. Carga del Convertidor

Para facilitar la introducción de los materiales al convertidor, este se inclina unos 30° respecto a la vertical, de manera que las cucharas o bandejas de carga puedan depositar los materiales.

En primer se introduce la chatarra, cuya cantidad oscila entre el 10 y el 30% de la carga del convertidor. Cabe recordar que esta chatarra no solo sirve para reducir los costes de producción reciclando acero sino que también actúa como refrigerante del proceso para evitar que se alcancen temperaturas demasiado elevadas que dañen el convertidor y produzcan problemas de equilibrio térmico. Una vez se ha completado la carga de la chatarra, el convertidor vuelve a colocarse en posición vertical para distribuir uniformemente la chatarra en el fondo del convertidor. (Palacios Reparaz et al., 2002)

El siguiente paso es el vertido del arrabio en el convertidor, sin embargo, el arrabio debe ser desescoriado antes de poder ser introducido, esto cobra especial importancia en caso de estar buscando un acero bajo en azufre. Una vez se ha completado el desescoriado que es realizado cuando el arrabio se encuentra en la cuchara de arrabio, un proceso cuya mecánica es bastante fácil de entender, basta con inclinar la cuchara

y arrastrar la escoria que flota en la superficie hacia el borde hasta que cae fuera. Esta escoria se hace caer sobre lo que se llama el “cono de escoria”. Una vez desescoriado el arrabio, se vuelve a inclinar el convertidor y se procede al vertido del arrabio.



*Figura 20. Carga del Convertidor. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)*

A continuación el convertidor se devuelve a la posición vertical y ya está listo para el soplado. Ahora el convertidor se aísla mediante dos puertas correderas refrigeradas por agua que cuentan con mirillas que permiten realizar un control visual desde el exterior. La misión de las puertas es asegurar que la colección de los humos es efectiva además de aislar del calor generado como consecuencia de las reacciones exotérmicas, el arrabio se introduce a unos  $1.330^{\circ}\text{C}$  y se llegan a superar los  $1.700$  grados. (Palacios Reparaz et al., 2002)

#### 4.3.2. Soplado de oxígeno

El soplado es la inyección de oxígeno en el convertidor mediante el uso de la lanza introducida por la boca de carga. Cada convertidor y cada tipo de acero poseen un esquema o patrón de soplado característico que depende de múltiples variables. El patrón de soplado consta de la siguiente serie de parámetros: volumen de oxígeno, caudal, presión, altura de la lanza sobre el baño y el gas de soplado de fondo.

Esta etapa comienza una vez la carga del convertidor ha sido completada, el convertidor se encuentra en posición vertical y las puertas correderas han sido cerradas. En ese momento se introduce la lanza y se hace descender hasta la posición de soplado deseada (90 – 300 cm) sobre el baño metálico, una vez colocada comienza el soplado. La presión a la que se inyecta el oxígeno debe ser suficiente para atravesar la capa de escoria que flota en la superficie y debe penetrar en el arrabio lo suficiente como para que produzca el efecto deseado, esta penetración en el arrabio tampoco debe ser excesiva. (Palacios Reparaz et al., 2002)

La inyección de oxígeno produce una depresión en la superficie del baño debido a la presión ejercida, esto crea una agitación en la zona, de la que pueden salir despedidas salpicaduras y emanar gases. Dado que la agitación no es excesiva, se producen zonas donde no existe agitación o es mínima, es aquí donde entra en juego el soplado de fondo LBE, que se encarga de la reducción de estas zonas muertas además de mejorar la agitación general del baño.

Las zonas muertas también son evitables disminuyendo el diámetro interno del convertidor y acercando la lanza al baño. Para minimizar este tipo de problema es necesario que la relación entre el diámetro del convertidor y el diámetro de la superficie de impacto creada por la cabeza de lanza debe ser el correcto. De la misma manera debe ser correlativa la profundidad del baño metálico y la profundidad de la depresión creada por la inyección de oxígeno. Los diámetros no pueden variarse puesto que están contruidos y no son modificables, por el contrario las profundidades si son modificables.(ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

Al principio del soplado se añaden los fundentes que forman parte de la escoria y que atrapan impurezas no deseadas. Una velocidad de inyección excesiva provoca una excesiva degradación del refractario además de aumentar las pérdidas de hierro en la escoria en forma de FeO que es oxidado debido a la gran cantidad de oxígeno presente.

Durante el soplado se distinguen tres zonas diferenciadas en el baño metálico que se muestran en la Figura 21 (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007):

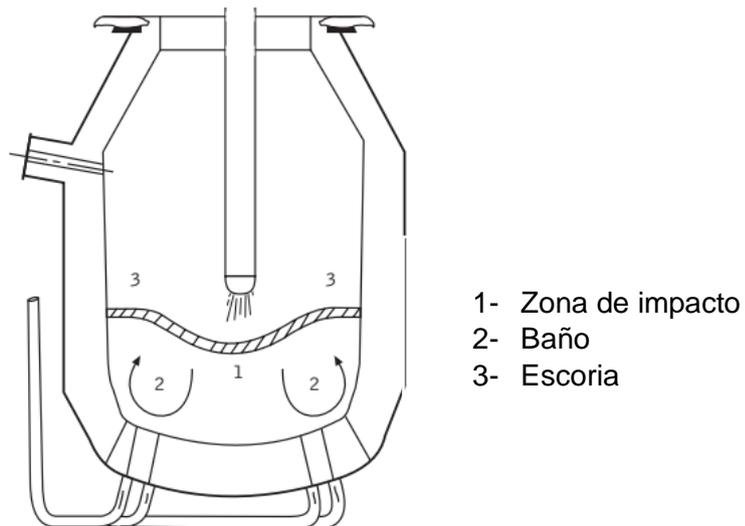


Figura 21. Zonas afectadas por la inyección del oxígeno. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007).

- La zona de impacto del chorro de oxígeno (nº 1 - Figura 21), es la zona directamente afectada por la inyección del oxígeno. Se alcanzan temperaturas muy altas (hasta 3.000°C). En esta zona se comienza a producir FeO, que es el mayor contribuyente de oxígeno para la eliminación de otros elementos.
- La zona del baño (nº 2 - Figura 21), es la zona que rodea a la anterior y donde se produce una intensa circulación del metal. Parte del FeO formado en la zona de impacto circula por esta zona mezclándose con el resto del arrabio provocando la oxidación del resto de elementos.
- La zona de la escoria (nº 3 - Figura 21), la escoria, flota sobre el baño metálico y durante el proceso de soplado se encuentra en ebullición en parte por el gran nivel de agitación. La espuma de la escoria puede alcanzar un espesor de varios metros en pleno proceso de soplado, los óxidos que se producen en el baño ascienden donde reaccionan con la escoria quedando atrapados gracias a la acción de la cal.

#### 4.3.3. Colada del Acero.

La colada o sangría del convertidor es su vaciado, donde el acero se vierte a la cuchara de acero y la escoria al cono de escorias. De nuevo el convertidor se inclina, en este caso se inclina para dejar salir el acero por la piqueta de sangría. Se monitoriza la cantidad de escoria que sale junto con el acero. En caso de rebasar los límites establecidos, se debe para la colada. Otro sistema que se utiliza para reducir la cantidad es un cono refractario cuya densidad se encuentra entre la del acero y la de la escoria de manera que cuando la escoria va a salir se interpone y cierra la piqueta de sangría.

No obstante es inevitable que algo de escoria se escape y es de hecho algo positivo puesto que evita que el carbono del acero se oxide en contacto con el aire una vez está en la cuchara de acero. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

Una vez se ha realizado la sangría del acero, se procede al vertido de la escoria al cono de escorias, el cual es enviado a la nave de escoria donde una vez enfriado se recupera el hierro presente y se recicla tanto este como la escoria para posteriores coladas.

Evidentemente existen diferentes maneras de realizar una colada. Coladas más lentas provocarán una mayor pérdida en la temperatura del baño. Esta velocidad de sangría también influye sobre la oxidación del acero. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

Durante esta etapa del proceso se suelen añadir ferroaleaciones al acero en la cuchara mientras se completa la sangría acabando su ajuste en las instalaciones de metalurgia secundaria.

#### 4.4. Sistema LBE (“Lanza-Burbujeo-Equilibrio”)

Este proceso consiste en la inyección de gases inertes (nitrógeno o argón) por el fondo del convertidor durante el proceso de afino. La inyección de gases inertes mejora la agitación y reduce las zonas muertas mediante la generación de corrientes ascendentes que mejoran la interacción entre el baño metálico y la escoria. Este sistema es utilizado debido a que el soplado de oxígeno no es ideal para alcanzar las condiciones perfectas en el acero producido (la escoria está sobreoxidada, las reacciones son lentas e incompletas, el control sobre la formación de escoria es complicado) (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007). Este proceso ayuda a mejorar el proceso LD en una serie de puntos que se enumeran a continuación:

El contenido de FeO en la escoria es menor ante aceros con el mismo contenido en carbono reduciendo las pérdidas de hierro (mejor rendimiento metálico).

Reduce el consumo de cal para conseguir niveles similares de fósforo y azufre. Este método también requiere menores consumos de fundentes tales como la dolomía y el espato flúor.

El contenido en oxígeno del acero producido es menor lo que no solo mejora la limpieza de dicho acero sino que también reduce el consumo de ferroaleaciones tales como el aluminio o el manganeso, siendo el consumo de este último también reducido debido a un aumento del manganeso residual en el baño metálico.

El sistema LBE también permite obtener aceros con niveles muy bajos en carbono y permite enfriar de manera más rápida el baño en caso de alcanzarse temperaturas demasiado elevadas. Además gracias a la mejora de la agitación del baño se consiguen reducir las proyecciones.

El criterio de elección entre nitrógeno y argón es una combinación de factores metalúrgicos y económicos. Esto es debido a que el nitrógeno es mucho más barato que el argón, sin embargo, es posible que por razones del baño sea necesario el uso de argón (por ejemplo, un exceso de nitrógeno disuelto en la mezcla sería perjudicial para el acero y en casos donde puede producirse, es necesario el uso de argón). También es típico el uso de una combinación de ambos. Al igual que el soplado de oxígeno, la inyección de gases inertes también sigue un patrón de soplado propio en el que se distinguen tres fases diferenciadas: el periodo inicial, el periodo final y el soplado metalúrgico. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

El periodo inicial se desarrolla desde el inicio del soplado de oxígeno hasta unos dos minutos previos a su finalización. En primera instancia, tiene lugar la etapa de ignición, donde se busca la homogeneización del baño además de acelerar el encendido del mismo, lo que mejora el rendimiento del soplado de oxígeno. Una vez se inflama el oxígeno y comienza la oxidación del silicio, seguida de las oxidaciones del manganeso y el hierro, la escoria se vuelve más viscosa, lo que dificulta la salida de gases circulantes del baño, es por esto que se reduce la inyección de gases inertes. Una vez se alcanza la etapa de decarburación la inyección de gases inertes se vuelve a incrementar para favorecer la eliminación de carbono. Los gases inertes mejoran la salida de las moléculas de CO adhiriéndose a las mismas y acelerando su ascensión. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

El periodo final se desarrolla en los momentos finales del soplado con oxígeno. En el caso de aceros de bajo o medio carbono se realiza un soplado de gas inerte. Su objetivo es la reducción del contenido en FeO de la escoria y el incremento del Mn residual en el baño. Esta agitación añadida acelera la oxidación del carbono y ayuda a limpiar el acero además de contribuir a la reducción del consumo de ferroaleaciones. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

El soplado metalúrgico tiene lugar una vez el soplado con oxígeno ha concluido. La inyección de gas inerte es alta en este momento para conseguir una mayor oxidación del carbono y del fósforo, una mejora en la homogeneización del baño (composición y temperatura), la refrigeración del baño y la reducción de la oxidación del baño. Este

soplado siempre puede realizarse con nitrógeno dado que al no inyectarse oxígeno no se disolverá en el baño. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

## 5. Reacciones del convertidor LD

Durante el proceso de conversión del arrabio en acero se distinguen una serie de fases diferenciadas por las diferentes reacciones que tienen lugar.

La primera etapa o etapa inicial dura unos cinco minutos desde el inicio del soplado. Durante esta etapa tiene lugar la oxidación del silicio, que es el elemento con mayor reactividad de la mezcla dando lugar a  $\text{SiO}_2$ . Esta reacción es altamente exotérmica lo que eleva la temperatura del baño. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

A continuación, la etapa que se desarrolla aproximadamente desde los cinco minutos hasta los quince minutos es la llamada etapa de decarburación creciente, en la cual tiene lugar la oxidación del manganeso, el carbono y el fósforo. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

La última etapa que toma lugar durante el proceso de afino o soplado es la etapa de decarburación decreciente y de oxidación del metal, que se desarrolla entre aproximadamente el minuto quince y el veinte. Durante este periodo, crítico para ciertos aceros como los inoxidable, la gran disminución en los niveles de carbono que ha sido producida hace que el acero comience a oxidarse lo que indica el final del proceso. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

En la Figura 22 se muestra la evolución en la concentración de los diferentes elementos que se encuentran involucrados en el proceso.

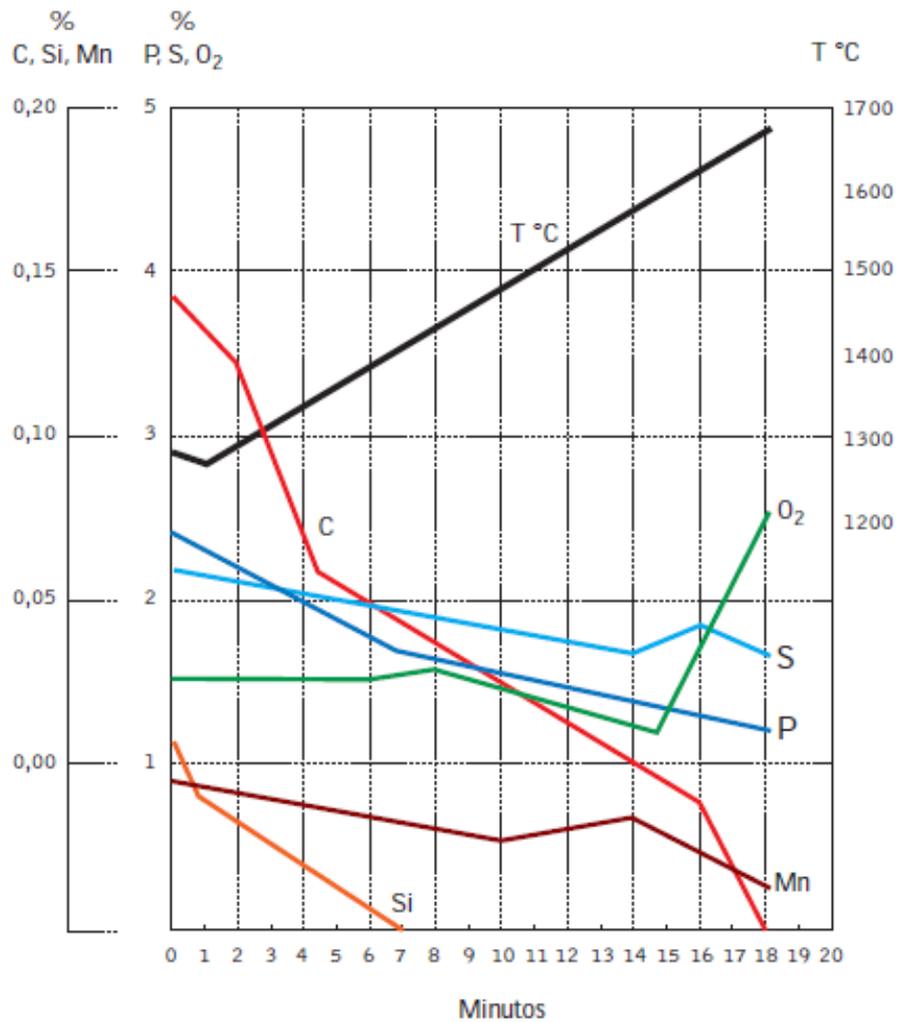
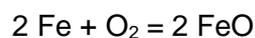


Figura 22. Evolución de los componentes del acero durante el proceso de soplado en el convertidor BOF. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007).

A continuación se realiza un estudio del proceso de eliminación de las diferentes impurezas presentes en el arrabio y la chatarra que se eliminan durante el proceso de afino.

### 5.1. Eliminación del Silicio

El oxígeno que se inyecta en el convertidor reacciona con el hierro formando FeO como se ha mencionado anteriormente, siendo este último un compuesto que es inestable en el ambiente químico del baño y que provoca la oxidación del resto de impurezas presentes en el baño metálico.



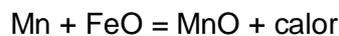
El silicio es el primer componente en ser oxidado, forma SiO<sub>2</sub> en una reacción que como ya he mencionado es altamente exotérmica.



Esta sílice pasa a formar parte de la escoria que flota en la superficie del baño al igual que lo hacen los óxidos de las demás impurezas. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

## 5.2. Eliminación del Manganeso

El siguiente componente en ser eliminado es el manganeso, que al igual que el silicio, reacciona con el óxido de hierro formado por la inyección de oxígeno dando lugar a óxido de manganeso. También es una reacción exotérmica que aporta calor al baño.



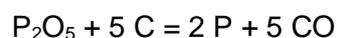
Una vez formado el MnO, pasa a formar parte de la escoria que flota. Sin embargo en el punto de máxima decarburación, este óxido es parcialmente reducido por el carbono, lo que se traduce en un aumento en Mn del baño. Es considerado como una ventaja dado que normalmente el manganeso es una ferroaleación que se añade en el proceso de metalurgia secundaria al acero y de esta manera se ahorra en dicha ferroaleación. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

## 5.3. Eliminación del Fósforo

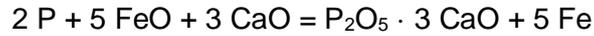
Cabe destacar que esta reacción es la más importante del proceso de afino. Debe ser llevada a cabo para alcanzar contenidos en peso alrededor de 0,025 – 0,030%. Algunos aceros, requieren niveles ultra bajos de fósforo, inferiores al 0,005% en peso (por ejemplo el acero usado en la industria del automóvil), ha hecho que la eliminación de este elemento sea crítica en el proceso de afino.

La presencia de fósforo en el acero está asociada a peores propiedades mecánicas, roturas intersticiales y microsegregación durante la solidificación del acero.

En el caso del fósforo, el óxido formado es el pentaóxido de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), pero debido a las altas temperaturas del baño, el óxido es reducido por el carbono y vuelve a formar parte del baño.



Debido a que el fósforo se combina con el carbono no podría realizarse la eliminación del mismo hasta que todo el carbono haya sido reducido, es decir, hasta que la decarburización fuese total. Debido a que esto es imposible, se añade cal (CaO), que reacciona con el óxido de fósforo formando fosfato de cal que no es reducido y que pasa a formar parte de la escoria. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)



La reacción anterior es reversible y por tanto para conseguir el desplazamiento hacia la derecha, es necesario que exista abundancia de FeO y CaO. De nuevo la reacción es exotérmica y requiere que la temperatura no sea excesivamente elevada. Como se ha dicho, al ser una reacción reversible, es necesario que las condiciones requeridas sean mantenidas a lo largo del proceso para evitar que el fósforo (impureza muy dañina) vuelva al baño.

Turkdogan (2010) expresó la reacción de defosforación de la escoria como la siguiente relación de la actividad:

$$[P] + \frac{5}{2}[O] + \frac{3}{2}(O^{2-}) \rightleftharpoons (PO_4^{3-}) \rightarrow K_P = \frac{a_{(PO_4^{3-})} a_{[Fe]}}{a_{HP(Fe)} [a_{HO(Fe)}]^{2.5} a_{(O^{2-})}^{1.5}}$$

Dado que el hierro del baño es prácticamente puro se considera que su actividad es igual a 1. La capacidad de absorción de la escoria fue a su vez definida por Turkdogan (1996) como la siguiente expresión:

$$\text{Capacidad de absorción de fósforo} = C_P = \frac{\% P_{(slag)}}{\% P_{(Fe)} [\% O_{(Fe)}]^{2.5} a_{(O^{2-})}^{1.5}} = L_{P,e} [\% O_{(Fe)}]^{-2.5} a_{(O^{2-})}^{-1.5}$$

donde  $L_{P,e}$  es el coeficiente de partición de fósforo.

El coeficiente de partición de fósforo es la relación entre la cantidad de fósforo que existe en la escoria y la que existe en el baño metálico, lo que significa que cuanto mayor sea este coeficiente, mayor cantidad de fósforo se encuentra en la escoria.

$$L_{P,e} = \frac{(\% P_{slag})}{[\% P_{Fe}]}$$

Tomando logaritmos y desarrollando la expresión para despejar el coeficiente de partición de fósforo resulta:

$$C_P = L_{P,e} [\% O_{(Fe)}]^{-2.5} a_{(O^{2-})}^{-1.5} \rightarrow \log(C_P) = \log(L_{P,e}) - 2.5 \log [\% O_{(Fe)}] - 1.5 \log \left[ a_{(O^{2-})} \right]$$

$$\log(L_{P,e}) = \log(C_P) + 2.5 \log [\% O_{(Fe)}] + 1.5 \log \left[ a_{(O^{2-})} \right]$$

En la Figura 23. Defosforación en el convertidor LD por reacción acero-escoria. (Turkdogan, 2010)., Turkdogan (2010) muestra la dependencia de la capacidad de absorción de fósforo de diferentes escorias a diferentes temperaturas y composiciones.

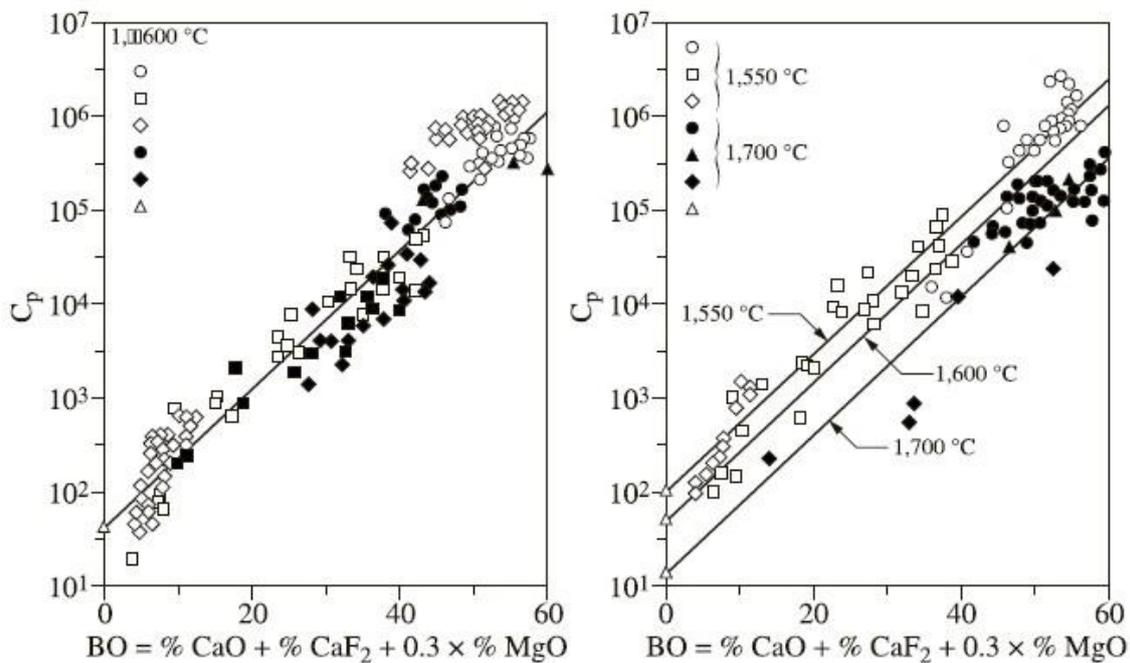


Figura 23. Defosforación en el convertidor LD por reacción acero-escoria. (Turkdogan, 2010).

En la Figura 23. Defosforación en el convertidor LD por reacción acero-escoria. (Turkdogan, 2010). se aprecia las diferencias en la capacidad de absorción ( $C_p$ ) de fósforo por parte de la escoria a diferentes basicidades, temperaturas alrededor de  $1600^\circ C$  en las que los efectos causados por  $CaO$ ,  $CaF_2$  y  $MgO$  sobre la  $C_p$  de escorias simples y complejas.

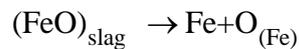
De la Figura 23 Turkdogan (2010), dedujo la relación entre la capacidad de absorción de fosfatos ( $C_p$ ) y las diferentes basicidades incluyendo las variaciones en temperatura:

$$\log(C_P) = mBO + n$$

Sustituyendo en la ecuación del coeficiente de partición resulta:

$$\log(L_{P,e}) = -9.87 + \frac{21740}{T} + 0.071BO + 2.5\log[\% O_{(Fe)}] + 1.5\log\left[a_{(O^{2-})}\right]$$

La relación entre el porcentaje en peso del oxígeno disuelto en el acero líquido y el porcentaje en peso del óxido de hierro presente en la escoria es:



$$\frac{[\% O_{(Fe)}]}{(\% FeO_{(slag)})} = (0.1T - 155.3) \times 10^{-4}$$

$$[\% O_{(Fe)}] = (\% FeO_{(slag)}) (0.1T - 155.3) \times 10^{-4}$$

Sustituyendo a su vez en la ecuación del coeficiente de partición:

$$\log(L_{P,e}) = -9.87 + \frac{21740}{T} + 0.071BO + 2.5\log\left[(\% FeO_{(slag)}) (0.1T - 155.3) \times 10^{-4}\right] + 1.5\log\left[a_{(O^{2-})}\right]$$

Estudiando ahora la ecuación resultante y teniendo en cuenta que se busca conseguir un coeficiente de partición de fósforo lo más alto posible (puesto que esto significa mayor cantidad de fósforo en la escoria y menor cantidad en el acero). Las condiciones buscadas para el mejor rendimiento de la defosforación en el convertidor serán aquellas que cuenten con la temperatura más baja posible. También deben contar con una alta basicidad (una escoria rica en cal). Un satisfactorio nivel de oxidación de hierro (en el caso de esta variable debe tomarse en cuenta el rendimiento metálico para minimizar las pérdidas de metal en el proceso). En la Figura 24 se muestra que este contenido en FeO de la escoria debe encontrarse entre el 16% y el 18% para maximizar la defosforación. La gráfica presenta una serie de escorias con diferentes basicidades cuyos máximos rendimientos son encontrados en este intervalo. Para escorias con mayor contenido en FeO este ratio de defosforación se ve reducido. De la gráfica también se puede concluir que el valor óptimo para el contenido en FeO es relativamente

independiente de la basicidad de la escoria. Por tanto se debe monitorizar este componente de la escoria para conseguir una buena eliminación del fósforo disuelto en el acero. (Turkdogan, 2010)

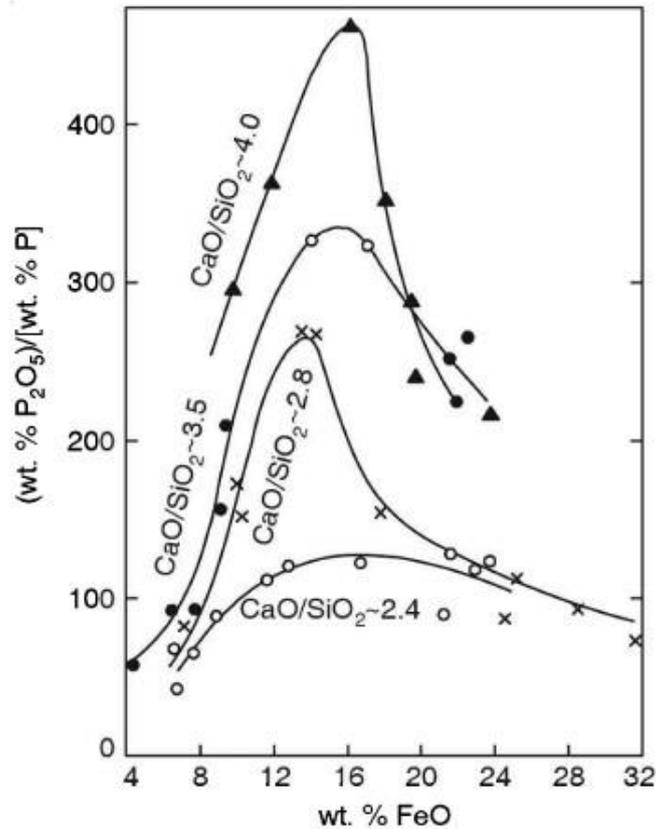
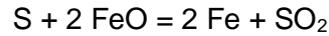


Figura 24. Ratio de defosforación como función del contenido en FeO de escorias con diferentes basicidades. (Turkdogan, 2010).

Además se debe evitar la adición excesiva de cal puesto que no toda es disuelta en la escoria y la cal no disuelta queda suspendida como partículas de CaO libre que no absorben fosfatos y provocan la ralentización de la reacción de absorción del fósforo por lo que es muy importante ajustar y corregir adecuadamente la composición de la escoria para llevar a cabo el cálculo del coeficiente de partición. Este último párrafo puede ser resumido en que para conseguir un buen rendimiento en la defosforación se debe contar con una escoria fluida y reactiva.

#### 5.4. Eliminación del Azufre

La eliminación del azufre es realizada de dos maneras diferentes, por los humos, método por el cual se elimina entre un 10% y un 15% de la cantidad total eliminada mediante la siguiente reacción.



El otro método de eliminación es por la escoria, al igual que el resto de impurezas, reaccionando con diferentes compuestos, puede formar sulfuro de calcio (SCa) o sulfuro de manganeso (SMn).



Como se indica en la reacción anterior, se trata de una reacción endotérmica que se ve favorecida por altas temperaturas de las que absorbe el calor necesario. Cabe mencionar que este tipo de eliminación requiere la fluidificación de la escoria mediante el uso de un fundente como puede ser el espato flúor. Es posible que el carbono se vea sustituido por el silicio, aunque a efectos de la reacción no hay cambios notables, cabe mencionar que esta reacción debe tener lugar al principio del proceso de afino dado que es el momento en el cual el silicio y el carbono son abundantes en el baño. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

El manganeso y su óxido pueden contribuir a la eliminación del azufre que se encuentra formando sulfuros de hierro (SFe).

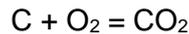
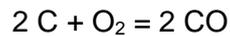


De nuevo para el buen desarrollo de estas dos reacciones son necesarios tanto altas temperaturas (reacciones endotérmicas) como abundancia de manganeso.

Es importante tener en cuenta el volumen de escoria a la hora de la eliminación del azufre puesto que el sulfuro de calcio formado con la cal tiene una solubilidad limitada en la escoria que puede alcanzar saturación y por tanto no reducir los niveles de azufre por debajo de la cantidad necesaria. Además es importante controlar los niveles de azufre presentes en el resto de elementos presentes en el proceso, no solo en el arrabio procedente del horno alto, esto es, cal, chatarra, sínter, mineral de hierro, etc. dado que esto puede suponer que si la eliminación no es calculada correctamente el acero tenga una concentración de azufre mayor que la del arrabio (cuyo azufre se encuentra principalmente en su escoria, de ahí la importancia del desescoriado en la cuchara de arrabio previo a su carga en el convertidor). (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

## 5.5. Eliminación del Carbono

El carbono es eliminado en forma de dióxido o monóxido de carbono, ambos en forma gaseosa y que son eliminados por la boca del convertidor hacia la zona de tratamiento de humos. Las reacciones que se producen en el convertidor que dan lugar a estos compuestos son las siguientes:



La velocidad con que el carbono se elimina depende de la cantidad de oxígeno (caudal, presión) y de la agitación del baño (altura de la lanza), la cual aumenta dicha velocidad a mayor agitación. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

Sin embargo, el contenido en carbono sigue siendo muy superior al necesario para considerarlo acero tras la eliminación del fósforo y el azufre por lo que el proceso de soplado continúa más allá para alcanzar los niveles necesarios de este elemento.

El contenido en este material es muy importante puesto que es además del hierro el segundo aleante más importante presente en el acero y su contenido siempre está muy restringido por las especificaciones del grado de acero que se está produciendo en ese momento.

El soplado de oxígeno provoca que el carbono reaccione con este y que se forme CO tal y como se muestra en las ecuaciones de más arriba, este compuesto es de gran importancia puesto que ayuda en la transferencia de calor al baño metálico además de limpiar el mismo expulsando gases perjudiciales para el acero como son el hidrógeno y el nitrógeno.

La eliminación de acero no es constante a lo largo del proceso de afino sino que es más pronunciada al principio y se ralentiza a medida que pasa el tiempo y el contenido en carbono se ve reducido, lo que significa que el baño no absorbe tanto oxígeno según se va eliminando el carbono. Es por esto que el sobresoplado con oxígeno no supone un gran riesgo para el acero que pueda modificar en gran medida la composición final de este, especialmente si se trata de aceros con bajo contenido en carbono. También cabe mencionar que el proceso de soplado no es 100% reversible en caso de necesitar realizar correcciones por medio de desoxidantes para elevar el contenido en carbono

debido a un exceso de soplado, es necesario eliminar mayores niveles de oxígeno que por un proceso de soplado convencional. (ETCF Arcelor Mittal Asturias, 2007)

## 6. Balance de Masa y Balance Térmico

El cálculo del balance de masa y del balance térmico son necesarios para a su vez poder calcular la carga, ajustar la composición de ciertas entidades como la escoria, ajustar la temperatura del acero y poder diagnosticar las pérdidas de calor y materiales.

### 6.1. Balance de Masa

El convertidor BOF es un reactor secuencial (*batch reactor*), donde el contenido es vaciado de colada a colada, es por eso que el balance de masa es efectivo para realizar el seguimiento de los materiales que se cargan, a la salida del convertidor y cuál es la composición final. Las diferencias entre la entrada y la salida puede achacarse a un desconocimiento sobre los diferentes parámetros que afectan a los materiales dentro del reactor a lo largo del proceso de conversión, o bien la incorrecta identificación de ciertos elementos cargados (desgaste del refractario, arrastre de escoria, etc), lo mismo puede ocurrir con algunas salida (humos, polvos, etc). (Steel University, 2011)

$$\sum_i ENTRADAS = \sum_o SALIDAS (+PÉRDIDAS)$$

Los balances de masa pueden ser realizados a diferentes niveles, es decir, puede realizarse un balance total, aunque también es posible realizar balances de un cierto elemento (gas, escoria, etc). Y también puede llegarse a componentes elementales del proceso (hierro, oxígeno, cal, etc). En el caso de los balances más concretos, se sigue la siguiente ecuación.

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

En función de los datos con los que se cuente en el momento en que se realiza el balance, es posible obtener diferentes resultados, desde las pérdidas, una evaluación de las cantidades  $Q_{E_i}$ ,  $Q_{S_i}$  (entrada o salida), o la evaluación de la composición  $\%X_{E_i}$ ,  $\%X_{S_i}$  (entrada o salida).

A continuación se estudia el balance térmico, para que este último sea válido es necesario establecer balances de masa precisos.

## 6.2. Balance Térmico

En el caso del balance térmico, se estudian los intercambios de calor que ocurren durante el proceso de conversión en el convertidor, para esto se utiliza la entalpía, H. Para cada material, los cambios de entalpía en función de la temperatura se expresan tal y como se muestra en la siguiente ecuación.

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

### 6.2.1. Establecimiento del Balance Térmico

La manera más sencilla de plantear el balance térmico es el cálculo de las transformaciones individuales de cada elemento químico relevante y juntarlas al final. Este cálculo se basa en el segundo principio de la primera ley de la termodinámica, el cual establece que “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”. Por ello se establece una temperatura arbitraria (por ejemplo 1600°C si se va a realizar el estudio de carga completa) para expresar la variación de entalpía de las transformaciones químicas, de manera que permita dichas variaciones entre de los componentes de la carga (reactivos) y los productos de la conversión (productos de reacción). (Steel University, 2011)

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

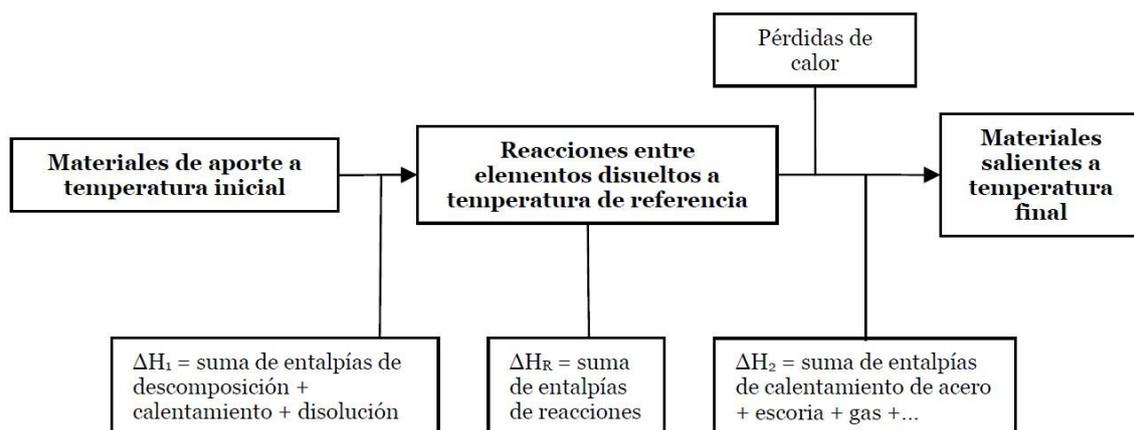


Figura 25. Esquema de cálculo para el balance térmico. (Steel University, 2011).

A continuación se muestran una serie de tablas que presentan valores sensibles para el cálculo de los términos  $\Delta H_1$ ,  $\Delta H_2$ ,  $\Delta H_R$ .

Tabla 1. Valores de entalpía para los materiales como una función de temperatura (Steel University, 2011)

	$H(1400\text{ °C}) - H(25\text{ °C})$ / MJ kg <sup>-1</sup>		$C_p$ a 1400 °C / kJ K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup>	
Metal caliente (líquido a 1400 °C)	1.30 a 1.37		0.87	
	$H(1600\text{ °C}) - H(25\text{ °C})$ / MJ kg <sup>-1</sup>		$C_p$ a 1600 °C / kJ K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup>	
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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (= > Fe <sub>líq</sub> + O)	4.43			
CaO	1.50		1.03	
	$H(1600\text{ °C}) - H(25\text{ °C})$ / MJ kg <sup>-1</sup> / MJ m <sup>-3</sup>		$C_p$ a 1600 °C / kJ K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> / kJ K <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup>	
Ar	0.82	1.46	0.53	0.93
CO	1.86	2.33	1.28	1.61
CO <sub>2</sub>	1.90	3.78	1.36	2.71
N <sub>2</sub>	1.84	2.30	1.28	0.95
O <sub>2</sub>	1.70	2.43	1.17	1.68

Tabla 2. Reacciones del oxígeno disuelto en acero líquido a 1600°C (MJ/Kg oxígeno) (Steel University, 2011)

A partir de gas O <sub>2</sub> a 25 °C	A partir de FeO <sub>x</sub> en escoria a 1600 °C	A partir de óxidos muy estables a 1600 °C
-5.62	8.7	18

Tabla 3. Entalpía de las reacciones de oxidación para diversos elementos. (Steel University, 2011).

Elemento X a Oxido $X_nO_m$	Calentamiento de 25 a 1600 °C + disolución	$C_p$ elemento X a 1600 °C	Oxidación X a 1600 °C por O disuelto	Oxidación X a 1600 °C por gas $O_2$ a 25 °C	Cantidad de $O_2$	
	/ MJ kg <sup>-1</sup>	/ kJ K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup>	/ MJ kg <sup>-1</sup>	/ MJ kg <sup>-1</sup>	/ kg	/ m <sup>3</sup>
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 <sub>2</sub>	4.56* a 6.0**	2.025	-15.35* a -16.79**	-30.35* a -31.79**	2.67	1.87
Al en Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- 0.17	1.175	- 22.32	- 27.32	0.89	0.62
Cr en Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>3</sub> P***	- 0.14	0.61	- 23.8	- 31.05	1.29	0.90
Si en C <sub>2</sub> S***	- 1.43	0.91	- 24.4	- 29.35	1.14	0.80

(\*) en acero líquido

(\*\*) en metal caliente

(\*\*\*) para formar 3 CaO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 2 CaO-SiO<sub>2</sub> con CaO necesario tomado a 1600 °C

Tabla 4. Entalpía de la descomposición de ferroaleaciones a 25°C. (Steel University, 2011).

Alto C Ferro-Cr	Ferro-Cr afinado	Alto C Ferro-Mn	Ferro-Mn afinado	Ferro-Silicio	Ferro-Silicio	Silicio-Manganeso
(64%Cr 5%C)	(73%Cr 0.5%C)	(78%Mn 7%C)	(80%Mn 1.5%C)	(75%Si)	(50%Si)	(35%Si)
0.11	- 0.025	0.10	0.075	0.37	0.70	0.71

El balance térmico dependiendo de la aplicación, puede ser utilizado para realizar diferentes tareas que se explican a continuación. Puede realizarse un diagnóstico de la carga, por ejemplo una evaluación de las pérdidas de calor durante el proceso de conversión. Se puede utilizar para el cálculo de la carga, que es el uso concreto que se verá más adelante, donde junto con los balances de masa, permite llevar a cabo el cálculo de la cantidad de materiales necesarios en la carga del convertidor para la obtención de acero líquido a una temperatura determinada. También es posible utilizar el balance térmico para realizar el ajuste de la temperatura del proceso, esto es posible mediante la adición de materiales exotérmicos o endotérmicos en función de las necesidades concretas.

## 7. Cálculo de la Carga

La composición de los productos de la reacción entre el arrabio y el oxígeno de soplado varían y esto en gran medida depende de las características del patrón de soplado y de las condiciones en que el oxígeno entra en contacto con el baño metálico. Este patrón de soplado puede influir en la composición del gas, esto es la relación de combustión secundaria, el PCR (post-combustion ratio) que es la fracción volumétrica de  $\text{CO}_2$  presente en el gas con respecto a la cantidad total de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$  [ $\text{CO}_2 / (\text{CO} + \text{CO}_2)$ ]. El soplado puede afectar a su vez el grado de oxidación del hierro en la escoria. Este grado de oxidación es restringido previamente al cálculo mediante la limitación del contenido de hierro en la escoria. En el caso de aceros inoxidable, se considera la oxidación del cromo, la cual es habitualmente fijada a través del rendimiento de la decarburación.

De este primer sistema se obtienen 4 ecuaciones que permiten la evaluación de las diferentes cantidades de oxígeno, acero líquido, escoria y gas que equivalen a la producción de una cantidad determinada de acero. Son los balances de Fe, O, gas y elementos de escoria (excepto Fe).

Restricciones adicionales añaden a su vez una nueva variable acompañada de su ecuación, en casos típicos estas restricciones adicionales son las siguientes.

- La temperatura del acero es fija. Esto significa la adición de un agente exotérmico o endotérmico en función de las necesidades.
- Adición de cal apagada para la obtención de una buena escoria que capte impurezas que deben ser eliminadas del acero.
- La adición de  $\text{MgO}$  para la extensión de la vida útil del refractario interno del convertidor. Esto es realizado mediante el aporte de dolomía.

*Tabla 5. Material de entrada y salida del Proceso de Metalurgia en el Convertidor LD. Modificado de (Steel University, 2011)*

<b>Entrada</b>	Arrabio	Peso fijo (o desconocido) ( $P_{\text{Arrabio}}$ ), composición y temperatura fijos
	Chatarra o mineral	Peso desconocido ( $P_{\text{Chatarra}}$ o $P_{\text{M}}$ ), composición y temperatura fijos
	Cal	
	Cal apagada o Dolomía	Peso desconocido ( $P_{\text{Chx}}$ o $P_{\text{Dolomía}}$ ), composición y temperatura fijos
	Oxígeno	Peso desconocido ( $P_{\text{O}}$ ), composición y temperatura fijos
<b>Salida</b>	Acero líquido	Peso desconocido (o fijo) ( $P_{\text{A}}$ ), composición y temperatura fijos

Escoria	Peso desconocido ( $P_L$ ), temperatura fija. Óxido de hierro y grado de oxidación fijos. La composición es calculada a partir de balances elementales
Gas	Peso desconocido ( $P_G$ ). Temperatura promedio y velocidad de combustión secundaria (PCR) fijas

Basando el sistema en la Tabla 5. Material de entrada y salida del Proceso de Metalurgia en el Convertidor LD. Modificado de (Steel University, 2011), existen 7 pesos desconocidos por lo que les corresponden 7 ecuaciones de equilibrio que se enumeran a continuación:

- Balance de Fe.
- Balance de O.
- Balance de Gas.
- Balance de elementos de escoria, excepto Fe.
- Balance de la ecuación de basicidad.
- Balance de magnesita.
- Balance de energía.

## 7.1. Balances de Masa

A continuación se escriben las ecuaciones de equilibrio para la carga estándar del convertidor.

### 7.1.1. Balance de Hierro

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

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

### 7.1.2. Balance de Oxígeno

Las cantidades de oxígeno asociadas a la oxidación de los diferentes elementos (C, Mn, P, Si) se calculan individualmente sobre las cantidades de estos óxidos ( $Q_C$ ,  $Q_{Mn}$ ,  $Q_P$ ,  $Q_{Si}$ ):

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

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

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

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

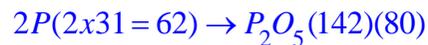
Teniendo en cuenta también el oxígeno destinado a oxidar el hierro (calculado a partir de la escoria) y el oxígeno disuelto en el acero, el balance resulta:

$$P_O + 0.01(\% O_M P_M) = \left[ \frac{16}{12}(1-PCR) + \frac{32}{12}PCR \right] Q_C + \frac{16}{55} Q_{Mn} + \frac{80}{62} Q_P + \frac{32}{28} Q_{Si} + 0.01(\% O_{Fe})_M P_L + 0.01(\% O_A P_A)$$

$$PCR = \frac{\% CO_2}{\% CO_2 + \% CO} \quad \text{Cantidad de oxígeno usado para oxidar el hierro} \quad \text{Cantidad de oxígeno disuelto en el acero}$$



usado para oxidar el hierro disuelto en el acero



El desarrollo para obtener la ecuación con los componentes fundamentales del sistema se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} P_O + 0.01(\% O_M P_M) = & \\ = & \left[ \frac{16}{12}(1-PCR) + \frac{32}{12}PCR \right] 0.01 \left[ \% C_{Arrabio} P_{Arrabio} + \% C_{Chatarra} P_{Chatarra} - \% C_{Acero} P_{Acero} \right] + \\ & + \frac{16}{55} 0.01 \left[ \% Mn_{Arrabio} P_{Arrabio} + \% Mn_{Chatarra} P_{Chatarra} - \% Mn_{Acero} P_{Acero} \right] + \frac{80}{62} 0.01 \left[ \% P_{Arrabio} P_{Arrabio} + \% P_{Chatarra} P_{Chatarra} - \% P_{Acero} P_{Acero} \right] + \\ & + \frac{32}{28} 0.01 \left[ \% Si_{Arrabio} P_{Arrabio} + \% Si_{Chatarra} P_{Chatarra} - \% Si_{Acero} P_{Acero} \right] + 0.01(\% O_{Fe})_M P_L + 0.01(\% O_A P_A) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_O + 0.01(\% O_M P_M) &= 0.01 \left\{ \left[ \frac{16}{12}(1-PCR) + \frac{32}{12}PCR \right] (\% C_{Arrabio}) + \left( \frac{16}{55} \right) (\% Mn_{Arrabio}) + \left( \frac{80}{62} \right) (\% P_{Arrabio}) + \left( \frac{32}{28} \right) (\% Si_{Arrabio}) \right\} P_{Arrabio} + \\
&+ 0.01 \left\{ \left[ \frac{16}{12}(1-PCR) + \frac{32}{12}PCR \right] (\% C_{Chatarra}) + \left( \frac{16}{55} \right) (\% Mn_{Chatarra}) + \left( \frac{80}{62} \right) (\% P_{Chatarra}) + \left( \frac{32}{28} \right) (\% Si_{Chatarra}) \right\} P_{Chatarra} - \\
&- 0.01 \left\{ \left[ \frac{16}{12}(1-PCR) + \frac{32}{12}PCR \right] (\% C_{Acero}) + \left( \frac{16}{55} \right) (\% Mn_{Acero}) + \left( \frac{80}{62} \right) (\% P_{Acero}) + \left( \frac{32}{28} \right) (\% Si_{Acero}) \right\} P_{Acero} + 0.01(\% O_{Fe})_M P_L + 0.01(\% O_A P_A) \\
0.01 \left\{ \left[ \frac{16}{12}(1-PCR) + \frac{32}{12}PCR \right] (\% C_{Arrabio}) + \left( \frac{16}{55} \right) (\% Mn_{Arrabio}) + \left( \frac{80}{62} \right) (\% P_{Arrabio}) + \left( \frac{32}{28} \right) (\% Si_{Arrabio}) \right\} P_{Arrabio} + \\
&+ 0.01 \left\{ \left[ \frac{16}{12}(1-PCR) + \frac{32}{12}PCR \right] (\% C_{Chatarra}) + \left( \frac{16}{55} \right) (\% Mn_{Chatarra}) + \left( \frac{80}{62} \right) (\% P_{Chatarra}) + \left( \frac{32}{28} \right) (\% Si_{Chatarra}) \right\} P_{Chatarra} + 0.01(\% O_{Fe})_M P_L - P_O - \\
&- 0.01(\% O_M) P_M = 0.01 \left\{ \left[ \frac{16}{12}(1-PCR) + \frac{32}{12}PCR \right] (\% C_{Acero}) + \left( \frac{16}{55} \right) (\% Mn_{Acero}) + \left( \frac{80}{62} \right) (\% P_{Acero}) + \left( \frac{32}{28} \right) (\% Si_{Acero}) - (\% O_A) \right\} P_A
\end{aligned}$$

### 7.1.3. Balance de Gas

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

$$\begin{aligned}
P_G &= \left[ \frac{28}{12}(1-PCR) + \frac{44}{12}PCR \right] Q_C = 0.01 \left[ \frac{28}{12}(1-PCR) + \frac{44}{12}PCR \right] \left[ \% C_{Arrabio} P_{Arrabio} + \% C_{Chatarra} P_{Chatarra} - \% C_A P_A \right] = \\
&= 0.01 \left[ \frac{28}{12}(1-PCR) + \frac{44}{12}PCR \right] \% C_{Arrabio} P_{Arrabio} + 0.01 \left[ \frac{28}{12}(1-PCR) + \frac{44}{12}PCR \right] \% C_{Chatarra} P_{Chatarra} - 0.01 \left[ \frac{28}{12}(1-PCR) + \frac{44}{12}PCR \right] \% C_A P_A \\
0.01 \left[ \frac{28}{12}(1-PCR) + \frac{44}{12}PCR \right] \% C_{Arrabio} P_{Arrabio} + 0.01 \left[ \frac{28}{12}(1-PCR) + \frac{44}{12}PCR \right] \% C_{Chatarra} P_{Chatarra} - P_G &= 0.01 \left[ \frac{28}{12}(1-PCR) + \frac{44}{12}PCR \right] \% C_A P_A
\end{aligned}$$

#### 7.1.4. Balance de elementos de escoria, excepto Fe

$$\begin{aligned}
\frac{71}{55} Q_{Mn} + \frac{142}{62} Q_P + \frac{60}{28} Q_{Si} + 0.01(\% CaO)_{Chx} P_{Chx} + 0.01(\% CaO)_{Dolomía} P_{Dolomía} + 0.01(\% MgO)_{Chx} P_{Chx} + 0.01(\% MgO)_{Dolomía} P_{Dolomía} &= 0.01 \left[ 100 - \% Fe_L - (\% O_{Fe})_L \right] P_L \\
\frac{71}{55} 0.01 \left[ \% Mn_{Arrabio} P_{Arrabio} + \% Mn_{Chatarra} P_{Chatarra} - \% Mn_{Acero} P_{Acero} \right] + \frac{142}{62} 0.01 \left[ \% P_{Arrabio} P_{Arrabio} + \% P_{Chatarra} P_{Chatarra} - \% P_{Acero} P_{Acero} \right] + \\
+ \frac{60}{28} 0.01 \left[ \% Si_{Arrabio} P_{Arrabio} + \% Si_{Chatarra} P_{Chatarra} - \% Si_{Acero} P_{Acero} \right] + 0.01(\% CaO)_{Chx} P_{Chx} + 0.01(\% CaO)_{Dolomía} P_{Dolomía} + 0.01(\% MgO)_{Chx} P_{Chx} \\
+ 0.01(\% MgO)_{Dolomía} P_{Dolomía} &= 0.01 \left[ 100 - \% Fe_L - (\% O_{Fe})_L \right] P_L \\
0.01 \left[ \frac{71}{55} \% Mn_{Arrabio} + \frac{142}{62} \% P_{Arrabio} + \frac{60}{28} \% Si_{Arrabio} \right] P_{Arrabio} + 0.01 \left[ \frac{71}{55} \% Mn_{Chatarra} + \frac{142}{62} \% P_{Chatarra} + \frac{60}{28} \% Si_{Chatarra} \right] P_{Chatarra} + \\
+ 0.01(\% CaO)_{Chx} P_{Chx} + 0.01(\% CaO)_{Dolomía} P_{Dolomía} + 0.01(\% MgO)_{Chx} P_{Chx} + 0.01(\% MgO)_{Dolomía} P_{Dolomía} - \\
- 0.01 \left[ 100 - \% Fe_L - (\% O_{Fe})_L \right] P_L &= 0.01 \left[ \frac{71}{55} \% Mn_{Acero} + \frac{142}{62} \% P_{Acero} + \frac{60}{28} \% Si_{Acero} \right] P_{Acero}
\end{aligned}$$

### 7.1.5. Índice de basicidad

Se establece el índice de basicidad  $v = (\%CaO + \%MgO) / \%SiO_2$

$$0.01(\% CaO)_{Chx} P_{Chx} + 0.01(\% CaO)_{Dolomía} P_{Dolomía} + 0.01(\% MgO)_{Chx} P_{Chx} + 0.01(\% MgO)_{Dolomía} P_{Dolomía} = v \frac{60}{28} Q_{Si}$$

$$0.01(\% CaO)_{Chx} P_{Chx} + 0.01(\% CaO)_{Dolomía} P_{Dolomía} + 0.01(\% MgO)_{Chx} P_{Chx} + 0.01(\% MgO)_{Dolomía} P_{Dolomía} = v \frac{60}{28} 0.01 \left[ \% Si_{Arrabio} P_{Arrabio} + \% Si_{Chatarra} P_{Chatarra} - \% Si_{Acero} P_{Acero} \right]$$

$$v \frac{60}{28} 0.01(\% Si_{Arrabio}) P_{Arrabio} + v \frac{60}{28} 0.01(\% Si_{Chatarra}) P_{Chatarra} - 0.01(\% CaO)_{Chx} P_{Chx} - 0.01(\% CaO)_{Dolomía} P_{Dolomía} - 0.01(\% MgO)_{Chx} P_{Chx} - 0.01(\% MgO)_{Dolomía} P_{Dolomía} = v \frac{60}{28} 0.01(\% Si_{Acero}) P_A$$

### 7.1.6. Balance de Magnesia

$$0.01(\% MgO)_{Chx} P_{Chx} + 0.01(\% MgO)_{Dolomía} P_{Dolomía} = 0.01(\% MgO)_L P_L$$

## 7.2. Balance de Energía

Sigue la siguiente ecuación:  $\Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \text{Pérdidas de calor} = 0$

Se toma como referencia 1600°C y los datos son obtenidos en las tablas 1, 2, 3 y 4.

Paso 1: la carga se lleva del estado inicial hasta los 1600°C

$$\begin{aligned} \Delta H_1 = & 0.00087(1600 - T_{\text{Arrabio}})P_{\text{Arrabio}} + (\text{calentamiento del arrabio}) \\ & + 1.35P_{\text{Chatarra}} + 4.43P_M + (\text{calentamiento y disolución de chatarra y mineral}) \\ & + 1.5P_{\text{Chx}} + 1.5P_{\text{Dolomía}} - (\text{calentamiento de cal apagada y dolomía}) \\ & - 5.62P_O (\text{calentamiento y disolución de oxígeno}) \end{aligned}$$

$$\Delta H_1 = 0.00087(1600 - T_{\text{Arrabio}})P_{\text{Arrabio}} + 1.35P_{\text{Chatarra}} + 4.43P_M + 1.5P_{\text{Chx}} + 1.5P_{\text{Dolomía}} - 5.62P_O$$

Paso 2: Entalpía de las reacciones entre los elementos disueltos a 1600°C

$$\Delta H_2 = [-3.37(1 - PCR) - 16.79xPCR]Q_C - 5.34Q_{Mn} - 23.8Q_P - 24.4Q_{Si} - 0.0296(\% Fe_L)P_L$$

$$\begin{aligned} \Delta H_2 = & [-3.37(1 - PCR) - 16.79xPCR]0.01[\% C_{\text{Arrabio}} P_{\text{Arrabio}} + \% C_{\text{Chatarra}} P_{\text{Chatarra}} - \% C_{\text{Acero}} P_{\text{Acero}}] - 5.34x0.01[\% Mn_{\text{Arrabio}} P_{\text{Arrabio}} + \% Mn_{\text{Chatarra}} P_{\text{Chatarra}} - \% Mn_{\text{Acero}} P_{\text{Acero}}] - \\ & - 23.8x0.01[\% P_{\text{Arrabio}} P_{\text{Arrabio}} + \% P_{\text{Chatarra}} P_{\text{Chatarra}} - \% P_{\text{Acero}} P_{\text{Acero}}] - 24.4x0.01[\% Si_{\text{Arrabio}} P_{\text{Arrabio}} + \% Si_{\text{Chatarra}} P_{\text{Chatarra}} - \% Si_{\text{Acero}} P_{\text{Acero}}] - 0.0296(\% Fe_L)P_L \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_2 = & 0.01\left\{[-3.37(1 - PCR) - 16.79xPCR]\% C_{\text{Arrabio}} - 5.34(\% Mn_{\text{Arrabio}}) - 23.8(\% P_{\text{Arrabio}}) - 24.4(\% Si_{\text{Arrabio}})\right\}P_{\text{Arrabio}} + \\ & + 0.01\left\{[-3.37(1 - PCR) - 16.79xPCR]\% C_{\text{Chatarra}} - 5.34(\% Mn_{\text{Chatarra}}) - 23.8(\% P_{\text{Chatarra}}) - 24.4(\% Si_{\text{Chatarra}})\right\}P_{\text{Chatarra}} - \\ & - 0.01\left\{[-3.37(1 - PCR) - 16.79xPCR]\% C_{\text{Acero}} - 5.34(\% Mn_{\text{Acero}}) - 23.8(\% P_{\text{Acero}}) - 24.4(\% Si_{\text{Acero}})\right\}P_A - 0.0296(\% Fe_L)P_L \end{aligned}$$

Paso 3: El acero, la escoria y el gas se llevan a su temperatura final. Utilizando los valores para  $\Delta T_{\text{acero}}$ ,  $\Delta T_{\text{escoria}}$  y  $\Delta T_{\text{gas}}$ , resulta en la siguiente ecuación:

$$\Delta H_3 = 0.00082(T_A - 1600)P_A + 0.00204(T_L - 1600)P_L + \\ + \left[ 0.00128(T_G - 1600)(1 - PCR) + 0.00136(T_G - 1600)PCR \right] 0.01 \left[ \% C_{Arrabio} P_{Arrabio} + \% C_{Chatarra} P_{Chatarra} - \% C_{Acero} P_{Acero} \right]$$

$$\Delta H_3 = 0.01 \left[ 0.00128(T_G - 1600)(1 - PCR) + 0.00136(T_G - 1600)PCR \right] \% C_{Arrabio} P_{Arrabio} + \\ + 0.01 \left[ 0.00128(T_G - 1600)(1 - PCR) + 0.00136(T_G - 1600)PCR \right] \% C_{Chatarra} P_{Chatarra} + 0.00204(T_L - 1600)P_L - \\ - \left\{ 0.01 \left[ 0.00128(T_G - 1600)(1 - PCR) + 0.00136(T_G - 1600)PCR \right] \% C_{Acero} - 0.00082(T_A - 1600) \right\} P_A$$

A continuación se presenta el desarrollo donde se implementan los 3 pasos mostrados previamente y las pérdidas de calor tal y como se indica en la siguiente ecuación:  $\Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \text{Pérdidas de calor} = 0$

$$0.00087(1600 - T_{Fte})P_{Fte} + 1.35P_{Fer} + 4.43P_M + 1.5P_{Chx} - 5.62P_O + \\ + 0.01 \left\{ \left[ -3.37(1 - PCR) - 16.79xPCR \right] \% C_{Arrabio} - 5.34(\% Mn_{Arrabio}) - 23.8(\% P_{Arrabio}) - 24.4(\% Si_{Arrabio}) \right\} P_{Arrabio} + \\ + 0.01 \left\{ \left[ -3.37(1 - PCR) - 16.79xPCR \right] \% C_{Chatarra} - 5.34(\% Mn_{Chatarra}) - 23.8(\% P_{Chatarra}) - 24.4(\% Si_{Chatarra}) \right\} P_{Chatarra} - \\ - 0.01 \left\{ \left[ -3.37(1 - PCR) - 16.79xPCR \right] \% C_{Acero} - 5.34(\% Mn_{Acero}) - 23.8(\% P_{Acero}) - 24.4(\% Si_{Acero}) \right\} P_A - 0.0296(\% Fe_L)P_L + \\ + 0.01 \left[ 0.00128(T_G - 1600)(1 - PCR) + 0.00136(T_G - 1600)PCR \right] \% C_{Arrabio} P_{Arrabio} + \\ + 0.01 \left[ 0.00128(T_G - 1600)(1 - PCR) + 0.00136(T_G - 1600)PCR \right] \% C_{Chatarra} P_{Chatarra} + 0.00204(T_L - 1600)P_L - \\ - \left\{ 0.01 \left[ 0.00128(T_G - 1600)(1 - PCR) + 0.00136(T_G - 1600)PCR \right] \% C_{Acero} - 0.00082(T_A - 1600) \right\} P_A + Q_P = 0$$

$$\left\langle \begin{aligned} &0.00087(1600 - T_{Arrabio}) + 0.01 \left\{ \left[ -3.37(1 - PCR) - 16.79xPCR \right] \% C_{Arrabio} - 5.34(\% \text{Mn}_{Arrabio}) - 23.8(\% \text{P}_{Arrabio}) - 24.4(\% \text{Si}_{Arrabio}) \right\} + \\ &+ 0.01 \left[ 0.00128(T_G - 1600)(1 - PCR) + 0.00136(T_G - 1600)PCR \right] \% C_{Arrabio} \end{aligned} \right\rangle P_{Arrabio} +$$

$$+ \left\langle \begin{aligned} &1.35 + 0.01 \left\{ \left[ -3.37(1 - PCR) - 16.79xPCR \right] \% C_{Chatarra} - 5.34(\% \text{Mn}_{Chatarra}) - 23.8(\% \text{P}_{Chatarra}) - 24.4(\% \text{Si}_{Chatarra}) \right\} + \\ &+ 0.01 \left[ 0.00128(T_G - 1600)(1 - PCR) + 0.00136(T_G - 1600)PCR \right] \% C_{Chatarra} \end{aligned} \right\rangle P_{Chatarra} +$$

$$+ 4.43P_{Mineral} + 1.5P_{Chx} + 1.5P_{Dolomía} - 5.62P_O + \left[ 0.00204(T_L - 1600) - 0.0296(\% Fe_L) \right] P_L =$$

$$= \left\langle \begin{aligned} &0.01 \left\{ \left[ -3.37(1 - PCR) - 16.79xPCR \right] \% C_A - 5.34(\% \text{Mn}_A) - 23.8(\% \text{P}_A) - 24.4(\% \text{Si}_A) \right\} + \\ &+ \left\{ 0.01 \left[ 0.00128(T_G - 1600)(1 - PCR) + 0.00136(T_G - 1600)PCR \right] \% C_A - 0.00082(T_A - 1600) \right\} \end{aligned} \right\rangle P_A - Q_P$$

### 7.3. Implementación de las ecuaciones de equilibrio

Debido a que el sistema generado es un sistema 7x7 es esencial el desarrollo de un método más rápido para la resolución del mismo puesto que cualquier cambio en la composición de los componentes de la carga altera la solución del mismo y la utilización del sistema sería muy lenta. Es por esto que mediante la utilización del programa Microsoft Excel he desarrollado una hoja de cálculo que permite la resolución del sistema automáticamente basado en las ecuaciones anteriores. A continuación se muestran unas capturas de pantalla en las que se muestra la zona de inputs donde se indican las composiciones de los diferentes componentes de la carga del convertidor.

Además de la posibilidad de realizar cambios en las composiciones de los materiales, se ha incluido también la opción del cálculo del coste por tonelada de acero de los materiales cargados en el convertidor.

Componentes de la carga del Convertidor BOF			
<b>Arrabio</b>		<b>Chatarra</b>	
(% Fe)=	94,52	(% Fe)=	100
(% C)=	4,5	(% C)=	0
(% Mn)=	0,5	(% Mn)=	0
(% P)=	0,08	(% P)=	0
(% Si)=	0,4	(% Si)=	0
(% S)=	0	(% S)=	0
		<b>Mineral (M)</b>	
		(% Fe)=	0
		(% C)=	0
		(% Mn)=	0
		(% P)=	0
		(% Si)=	0
		(% O)=	0
		(% O <sub>2</sub> )=	0
		<b>Acero (A)</b>	
		(% Fe)=	99,82
		(% C)=	0,05
		(% Mn)=	0,12
		(% P)=	0,01
		(% Si)=	0
		(% O)=	0
<b>Escoria (L)</b>		<b>Cal (Chx)</b>	
(% Fe)=	18	(% CaO)=	98,2
(% C)=	0	(% MgO)=	1,8
(% Mn)=	0		
(% P)=	0	<b>Dolomía</b>	
(% Si)=	0	(% CaO)=	59,35
(% O <sub>2</sub> )=	5,445269	(% MgO)=	40,65
(% MgO)=	10		
		<b>Oxígeno (O)</b>	
		(% O)=	100
		<b>Gas (G)</b>	
		Pérdidas Calor	65
		(MJ/t acero)	
		<b>PCR = TCS</b>	0,08
		T Arrabio (°C)	1350
		T Acero (°C)	1650
		T Gas (°C)	1500
		T Escoria (°C)	1650
		v=(%CaO)/(%SiO <sub>2</sub> )	4
		Peso Acero (kg)	250000
		Peso Mineral (kg)	0

Figura 26. Inputs del sistema para el cálculo de la carga del convertidor BOF

En la Figura 26 se observan los diferentes inputs para el cálculo de la carga del convertidor, separados por material (arrabio, chatarra, mineral, acero, escoria, cal y dolomía). También cuenta con las pérdidas de calor en forma de humos. También se pueden modificar las temperaturas de los diferentes elementos que actúan en el balance térmico (arrabio, acero, gas, escoria).

El sistema 7x7 que se resuelve para determinar la composición de la carga del convertidor se presenta en forma matricial en la Figura 27, donde se aprecia la matriz de coeficientes y anexa, en la última columna la matriz de coeficientes. Para su resolución se invierte la matriz de coeficientes y se multiplica por el término independiente, estos resultados son los mostrados en la Figura 28. Resultados (Pesos de los componentes de la carga del convertidor BOF)..

Sistema 7x7 para la Carga del Convertidor BOF								
BALANCES	Arrabio	Chatarra	Cal	Oxígeno	Escoria	Gas	Dolomía	Término Independient
Hierro	0,9452	1	0	0	-0,18	0	0	249550
Oxígeno	0,0718582	0	0	-1	0,0544527	0	0	299,5307918
Gas	0,1098	0	0	0	0	-1	0	305
Escoria (Excepto Fe)	0,0168582	0	1	0	-0,7655473	0	1	444,5307918
Índice Basicidad	0,0342857	0	-1	0	0	0	-1	0
Magnesia	0	0	0,018	0	-0,1	0	0,4065	0
Térmico	-0,1315908	1,35	1,5	-5,62	-0,4308	0	1,5	-13083,53
Matriz Inversa de los Coeficientes								
	0,7529212	3,1343829	0	0,3597626	-0,4768165	0	-0,5577194	
	0,297393	-2,9249269	0	-0,5708472	0,2098272	0	0,5204496	
	0,0140631	0,0585443	0	0,3429501	-0,7190077	-2,5740026	-0,0104171	
	0,0568426	-0,7633665	0	-0,0439684	-0,1071269	0	-0,0421056	
	0,0503004	0,2093988	0	-1,2822203	-1,3381097	0	-0,0372596	
	0,0826707	0,3441552	-1	0,0395019	-0,0523545	0	-0,0612376	
	0,0117513	0,0489203	0	-0,3306153	-0,2973403	2,5740026	-0,0087047	

Figura 27. Matriz de implementación de las ecuaciones de equilibrio de la carga del convertidor BOF.

RESULTADOS	
Peso Componente	KG
<b>Acero</b>	<b>1000</b>
<b>Arrabio</b>	<b>821,26</b>
<b>Chatarra</b>	<b>231,41</b>
<b>Cal</b>	<b>15,94</b>
<b>Oxígeno</b>	<b>60,68</b>
<b>Escoria</b>	<b>52,54</b>
<b>Gas</b>	<b>88,95</b>
<b>Dolomía</b>	<b>12,22</b>

Figura 28. Resultados (Pesos de los componentes de la carga del convertidor BOF).

En la Figura 29 se muestra la tabla donde se introducen los costes unitarios de los materiales que se introducen en el convertidor y el resultado es el coste en función del uso de cada uno por tonelada de acero producida.

<b>Componente</b>	<b>Coste (€/kg)</b>
<b>Arrabio</b>	0,179
<b>Chatarra</b>	0,119
<b>Mineral</b>	0,119
<b>Cal</b>	0,077
<b>Dolomía</b>	0,077
<b>Coste Materiales(€)/t acero</b>	
<b>176,71</b>	

Figura 29. Input costes unitarios de materiales y coste por tonelada de acero producido

## 8. Simulación del Convertidor LD

Para llevar a cabo la simulación se utilizó el programa de simulación de Steel University, donde el objetivo es la realización de una colada de acero entre 260 y 290t. El usuario debe seleccionar el tipo de acero que se desea obtener y a partir de ahí realizar la selección de material para la carga en función del acero y de los materiales disponibles. El programa permite el uso de los siguientes materiales, arrabio, chatarra liviana, chatarra pesada, mineral de hierro, cal y dolomía.

Se deben cumplir los niveles requeridos tanto de carbono como de impurezas en función del grado de acero deseado. En este caso se buscó la fabricación de acero convencional de construcción (aplicación general), en este caso se debe conseguir la reducción de los niveles de carbono para que se encuentren en el intervalo 0,1-0,16%. El nivel de fósforo tampoco puede superar el 0,025%.

Mediante el uso del método de la hoja de Excel creada se puede obtener una carga del convertidor, en este caso, debido a restricciones del software, el peso de la escoria obtenido en la hoja Excel es superior al finalmente introducido para realizar la simulación debido a las propiedades refrigerantes que le han sido concedidas en el caso de este simulador. En la Figura 30 se muestran los pesos de los materiales cargados en el convertidor.

Materia prima	Costo unitario		Masa		Costo
Metal caliente	\$210.00/t	▼	280	▲	\$ 58800
Chatarra liviana	\$0.15/kg	▼	4400	▲	\$ 660
Chatarra pesada	\$0.13/kg	▼	1000	▲	\$ 130
Mineral de hierro	\$0.14/kg	▼	4100	▲	\$ 574
Cal	\$0.09/kg	▼	3800	▲	\$ 323
Dolomita	\$0.09/kg	▼	2700	▲	\$ 230
<b>Total</b>			<b>296</b>		<b>\$ 60717</b>
<b>Costo por tonelada métrica</b>					<b>213</b>

Figura 30. Carga del convertidor.

También se debe seleccionar la temperatura del arrabio y el flujo de inyección de gas inerte por el fondo del convertidor (Figura 31).

Seleccione la temperatura del metal caliente (°C)	Seleccione el caudal de gas de agitación por el fondo (N <sub>2</sub> )
 1300 	 0,10 
N.B. Todos los demás materiales se encuentran a temperatura ambiente, es decir a 20°C	N.B. El costo del nitrógeno es: \$0.07/Nm <sup>3</sup>

Figura 31. Selección de temperatura y soplado de fondo.

Antes de comenzar la simulación se muestra una pantalla (Figura 32) donde se pueden revisar todos los parámetros seleccionados hasta ese momento además de las restricciones propias del acero que se desea producir.



Figura 32. Resumen de condiciones, parámetros y carga previo a la simulación.

Una vez se está conforme con la carga y el resto de parámetros se inicia la simulación. En la primera etapa del proceso es importante mantener a una altura ligeramente elevada la lanza de oxígeno para formar una buena escoria espumante que atrape el mayor número de impurezas posible para producir el acero más limpio posible. La configuración de esta etapa inicial se muestra en la Figura 33.

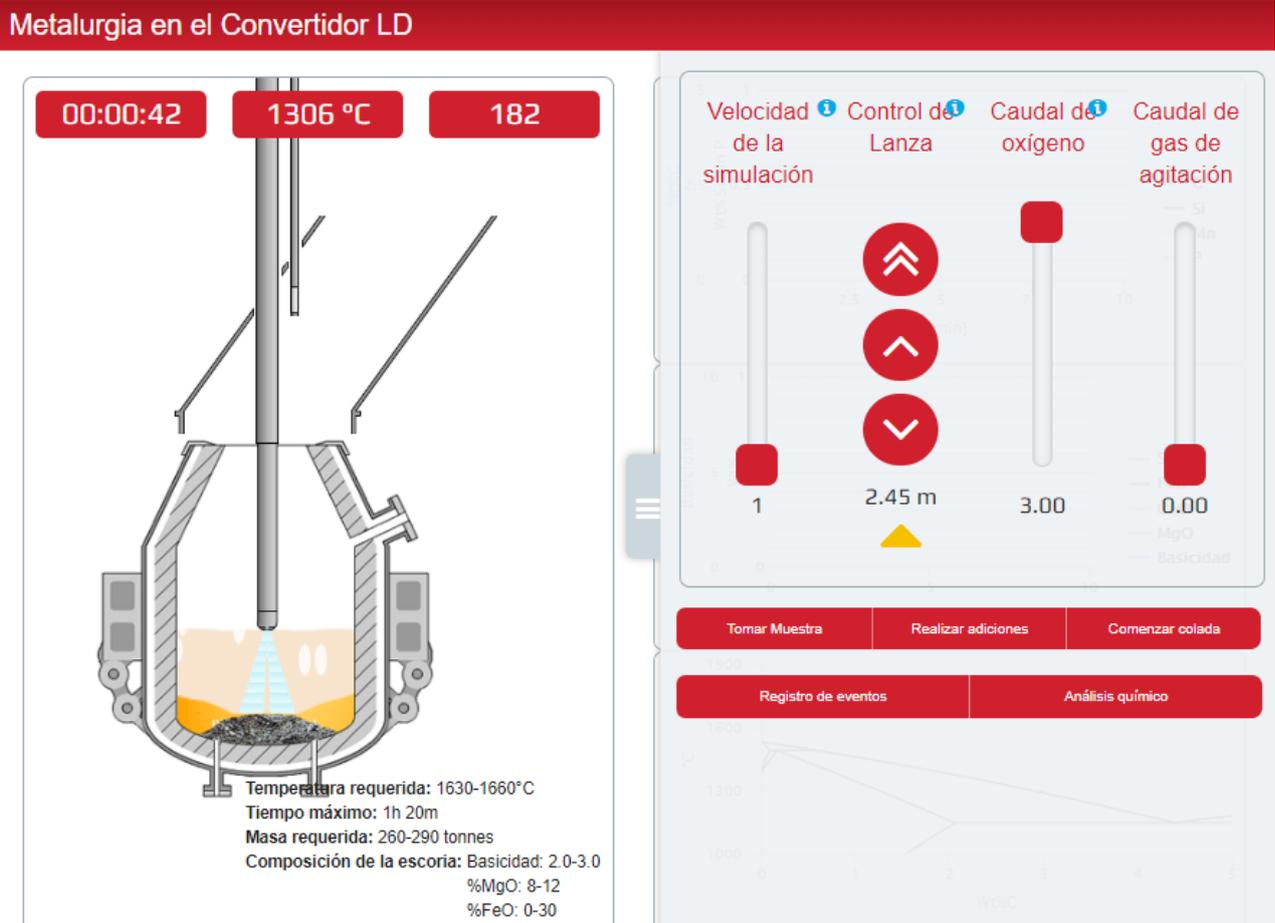


Figura 33. Formación de la escoria espumante.

Como se observa en la Figura 33, el simulador permite el manejo de la altura de la lanza, el caudal de oxígeno y el caudal de la inyección de gas inerte por el fondo del convertidor. También muestra el tiempo de simulación, la temperatura del baño y la cantidad de oxígeno que ha sido soplada en  $\text{Nm}^3$ .

También permite realizar el análisis químico del baño mediante el uso de la sublanza (opción “tomar muestra”) como el que se muestra en la Figura 35. Esta toma de muestra presenta el contenido en carbono automáticamente como se muestra en la Figura 34.

## Contenido de carbono y temperatura

Elemento	Actual	Min	Máx
C	3.003 wt-%	0.100 wt-%	0.160 wt-%
Temperatura del acero: 1537 °C			

Figura 34. Muestra subblanza (análisis instantáneo - contenido en carbono y temperatura del baño).

## Composición del acero líquido / wt%

Elemento	Actual		Min	Máx
C	3.00337	✘	0.1000	0.1600
Si	0.00424	✔		0.2500
Mn	0.36674			
P	0.00035	✔		0.0250
S	0.02191	✔		0.1000
Cr	0.00500	✔		0.1000
Al				
B				
Ni	0.00770	✔		0.1500
Nb	0.00002	✔		0.0500
Ti	0.00029	✔		0.0100
V	0.00010	✔		0.0100
Mo	0.00270	✔		0.0400
Ca				
N		✔		0.0500
H				
O	0.00115			
Tiempo de análisis: 00.07.27				

Figura 35. Análisis químico del baño mediante la toma de muestra con la subblanza.

Además de esta información, se muestran 3 gráficas que son actualizadas cada minuto de simulación tal y como se muestra en la Figura 36. La primera muestra la evolución del contenido en carbono, fósforo, silicio y manganeso. La segunda muestra la

composición de la escoria a lo largo del tiempo, toma en cuenta el contenido en silicio, hierro, cal, magnesia y la basicidad, parámetros que para completar una simulación exitosa deben estar contenidos dentro de ciertos intervalos indicados en el resumen y en la imagen del convertidor (por ejemplo el %MgO en la escoria debe encontrarse entre el 8% y el 12% para proteger el refractario del convertidor). La tercera gráfica representa la temperatura del baño en función del contenido en carbono y su comparación con la temperatura de la curva liquidus. La temperatura del baño debe encontrarse siempre por encima de la curva liquidus, como sucede en este caso, para evitar solidificaciones parciales que provoquen paradas en el convertidor y pérdidas de material.

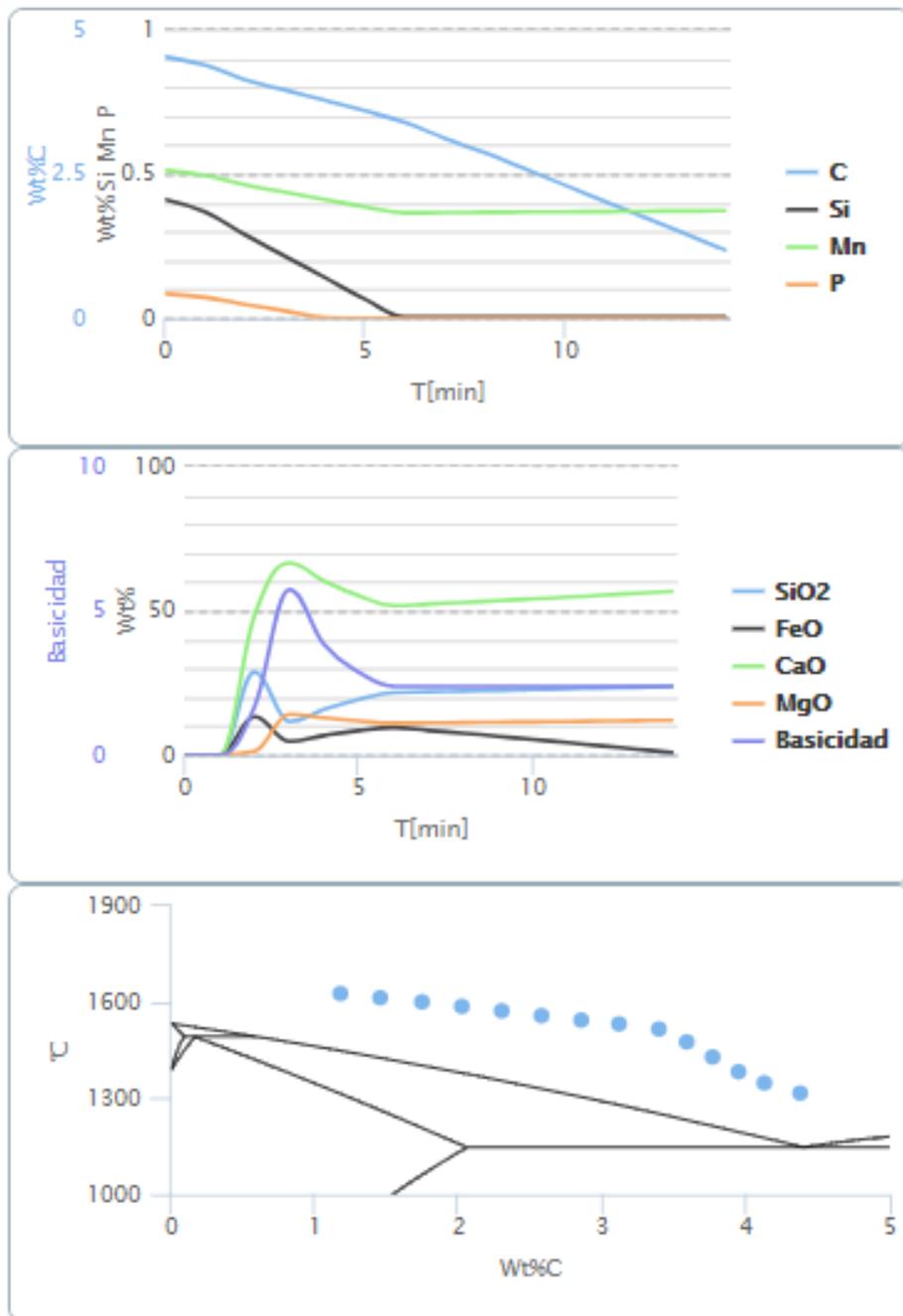


Figura 36. Gráficas evolución de la simulación.

Se baja el caudal de oxígeno para controlar la temperatura que no debe superar los 1660°C (Figura 37).

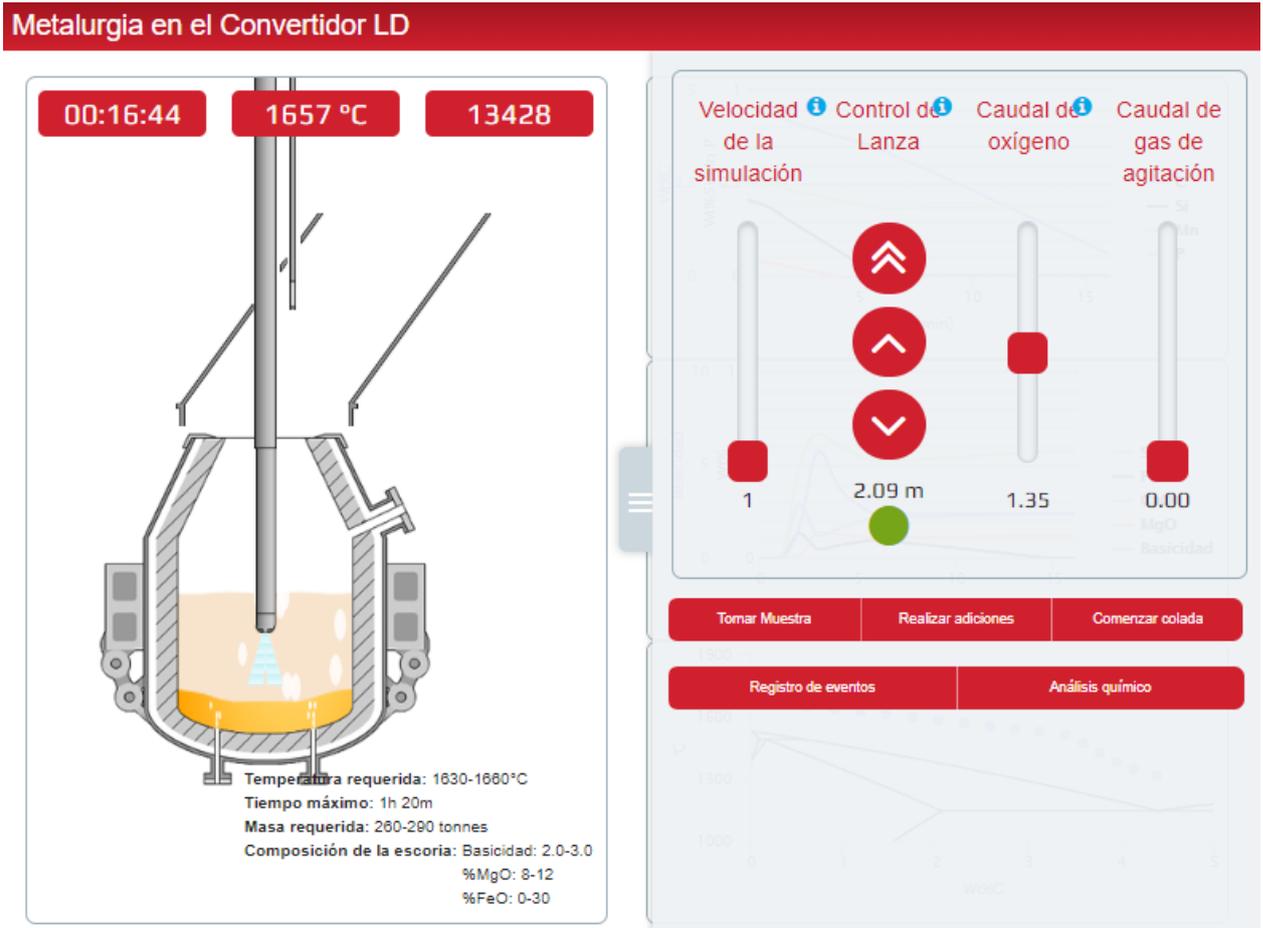


Figura 37. Reducción del caudal de oxígeno para el control de temperatura.

Una vez el contenido en carbono se halla dentro del intervalo deseado, se detiene el soplado de oxígeno y se procede a la sangría del convertidor como se observa en la figura Figura 38

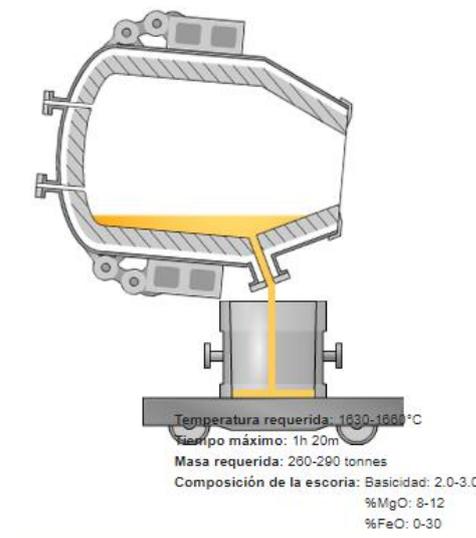


Figura 38. Sangría del convertidor.

Una vez completada la sangría se muestra un resumen de las características del acero donde se confirma si la colada cumple las características del acero que se buscaba producir como se muestra en la Figura 39.

			Objetivo
Tiempo total	0H:26M	✓	1H:20M
Masa de la colada	273 tonnes	✓	280-290 tonnes
Temperatura de la colada	1652 °C	✓	1630-1660 °C
Composición final del acero		✓	
Composición final de escoria		✓	
Metal caliente	\$58800		
Adiciones	\$1916.5		
Otros consumibles	\$2803		
Costo Total	\$63519.5 (\$232.41/t)		

Figura 39. Resumen final de la simulación.

Además se puede conocer la composición final tanto del acero como de la escoria (Figura 40 y Figura 41). Donde en este caso todas las restricciones han sido cumplidas pero en caso de no haber sido así se podría encontrar el problema y donde ha fallado la simulación.

## Composición final del acero / wt%

Elemento	Actual		Min	Máx
C	0.11125	✓	0.1000	0.1600
Si	0.00437	✓		0.2500
Mn	0.37809	✓		1.5000
P	0.00036	✓		0.0250
S	0.02259	✓		0.1000
Cr	0.00516	✓		0.1000
Al				
B				
Ni	0.00794	✓		0.1500
Nb	0.00002	✓		0.0500
Ti	0.00030	✓		0.0100
V	0.00010	✓		0.0100
Mo	0.00278	✓		0.0400
Ca				
N		✓		0.0500
H				
O	0.00119			
Tiempo de análisis: 00.07.27				

Figura 40. Composición final del acero producido.

## Composición final de escoria

Elemento	Actual		Min	Máx
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0000			
CaO	50.0377			
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0000			
FeO	12.5985	✓		30
MgO	10.6525	✓	8	12
MnO	4.2711			
SiO <sub>2</sub>	20.9732			
P	1.4267			
S	0.0423			
Basicidad de la escoria	2.3858	✓	2	3

Figura 41. Composición final de la escoria.

Para finalizar se pueden extraer las gráficas de evolución de la composición del acero, la escoria y la temperatura del baño metálico como se muestran en la Figura 42.

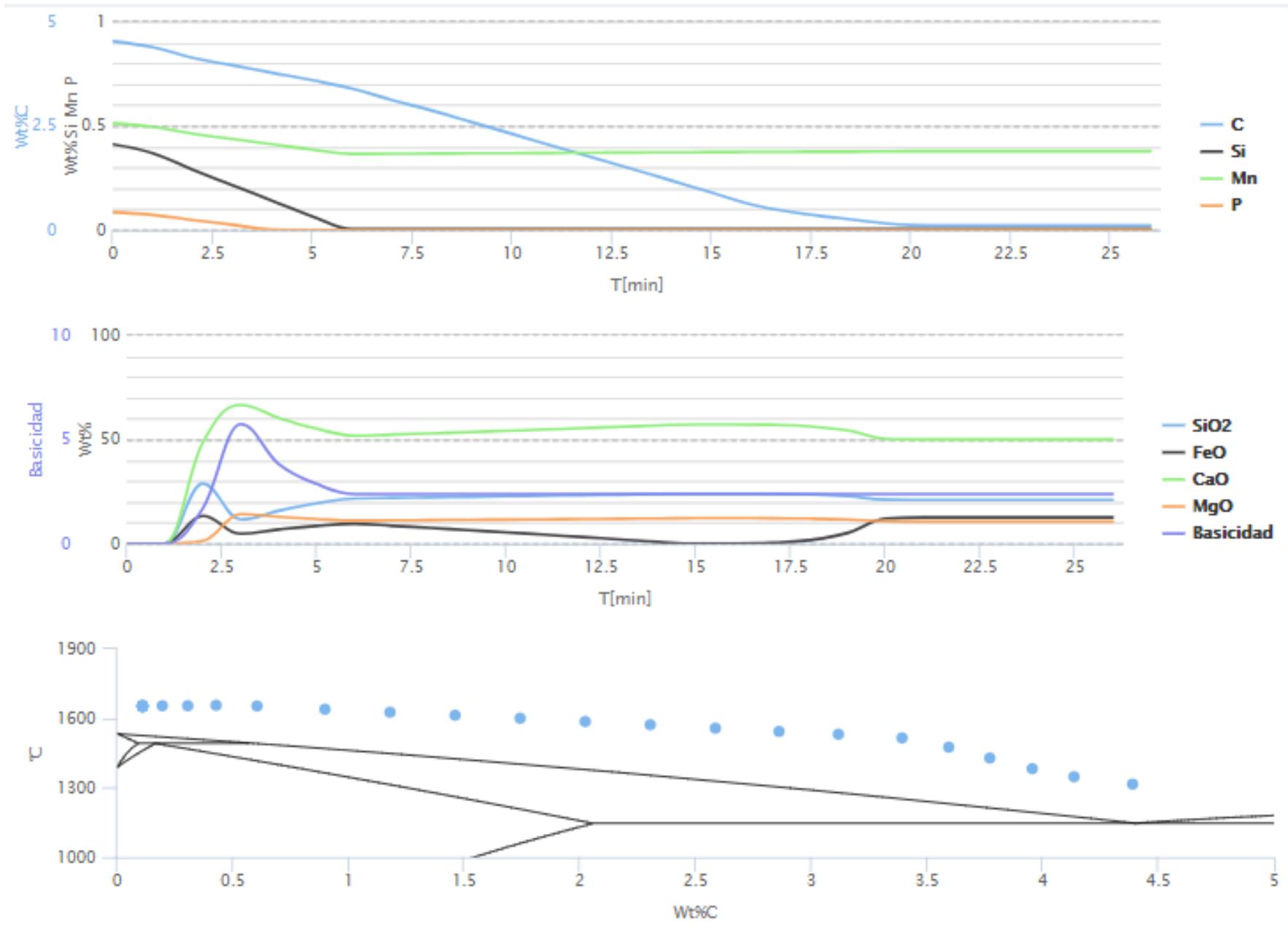


Figura 42. Evolución de la colada. (Composición acero, composición escoria y temperatura del baño).

## 9. Conclusiones

La primera parte de este trabajo muestra la evolución de la industria siderúrgica y como su evolución acompañó a grandes hitos tecnológicos de la historia como la Revolución Industrial. Además se ha prestado un mayor interés en aquellos avances que estaban relacionados con la producción de acero o que dieron pasos en esa dirección como la forja catalana o el convertidor Bessemer. Fue el desarrollo de los convertidores del siglo XIX lo que supuso el inicio del uso masivo de este material omnipresente actualmente gracias al gran aumento en la productividad.

Posteriormente se realizó un estudio con cierto nivel de detalle sobre el proceso más común hoy en día, la vía del convertidor LD, que fue implementado en la segunda mitad del siglo XX y que todavía sigue siendo la principal forma de producción de acero. Durante esta sección del trabajo se estudió desde las instalaciones hasta las materias primas involucradas en este proceso.

A continuación se realizó un estudio de las reacciones que tienen lugar durante la conversión del arrabio procedente del horno alto en acero que suceden dentro del convertidor LD. Seguidamente se presentan los desarrollos correspondientes a los balances de masa y energía necesarios para realizar el cálculo de la carga del convertidor, siendo este uno de los puntos más trabajados y que constituyen una pieza de trabajo muy interesante. Con las ecuaciones obtenidas, se programó una hoja de cálculo que permite determinar la carga del convertidor de manera casi instantánea. De no ser así, el proceso es muy largo y tedioso debido a que es necesario la resolución de un sistema de siete ecuaciones y siete incógnitas. Con la ayuda de este método es posible determinar una aproximación de la carga que sería necesaria para la obtención de un nuevo acero del cual no se poseen datos empíricos y por tanto un nuevo patrón de soplado y carga es necesario.

A continuación con la ayuda de la hoja de cálculo creada y modificando los parámetros se procede a utilizar el simulador de Steel University para el convertidor LD donde es posible realizar una colada de acero tal y como se ha mostrado en el apartado anterior donde existen una serie de restricciones que deben ser cumplidas para completar una colada de manera exitosa como son las composiciones del acero y la escoria, la temperatura del acero determinadas por el grado de acero que se busque en cada caso. Este simulador puede ser utilizado como segunda parte del método para el diseño de un nuevo acero del cual se desconocen sus patrones de soplado y de esta manera recibir una aproximación de cómo abordar dicho soplado antes de pasar a la realización de coladas experimentales.

## 10. Glosario de Términos

- Tenacidad: es la resistencia de un material a ser roto, molido, doblado o desgarrado, siendo una medida de su cohesión.
- Maleabilidad: es la cualidad de un material con respecto a su facilidad para conformarse en hojas delgadas por deformación.
- Forjabilidad: la capacidad de deformación plástica de un material metálico sin llegar a romperse.
- Pudelado: proceso metalúrgico por el cual se consigue la reducción de los niveles de carbono para producir hierro forjado directamente.
- Material refractario: se dice de materiales que son capaces de resistir altas temperaturas (habitualmente  $>1600^{\circ}\text{C}$ ) sin descomponerse.
- Muñones: son los salientes laterales del convertidor que permiten apoyarlo sobre el mecanismo de giro que permite la inclinación del convertidor para cargarlo y realizar la colada.
- Gunitado: habitualmente se trata de la proyección de hormigón mediante un sistema de manguera de alta presión (p.ej. utilizado como sostenimiento en túneles) aunque en este caso se refiere a la inyección de nitrógeno para la proyección de escoria como protectora del refractario interno del convertidor LD.
- Entalpía (H): es la cantidad de energía almacenada por una sustancia. Puede ser tanto negativa como positiva en función de ser una sustancia exotérmica (negativa) o endotérmica (positiva).
- Sobresoplado: es un soplado con oxígeno que puede ser realizado posterior a la toma de muestras final para ajustar la composición y/o la temperatura final del acero líquido en el convertidor LD.
- Índice de basicidad: es una fórmula empírica que relaciona la proporción de sustancias alcalinas o básicas en la escoria, en el caso de este trabajo esas sustancias son la cal ( $\text{CaO}$ ), la magnesia ( $\text{MgO}$ ) y la sílice ( $\text{SiO}_2$ ).
- Coeficiente de partición: es el cociente entre la concentración de una sustancia entre dos fases diferentes de una mezcla. En el caso de este trabajo se refiere al cociente entre las concentraciones de fósforo de la escoria y del acero líquido.

## 11. Bibliografía

- Alamy (n.d.). *Sección Vertical de un Horno Osmund*. [imagen] Disponible: <https://goo.gl/gFV1Kp> [Acceso Jun. 2018].
- Amoss, D. (2010). *Basic Oxygen Steel Making Converter Lives*. Refractories 2010 Conference - The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- Barker, K., Paules, J., Rymarchyk, N. and Jancosko, R. (1998). *The Making, Shaping and Treating of Steel*. Capítulo 8: Oxygen Steelmaking Furnace Mechanical Description and Maintenance Considerations. Pittsburgh, PA, EEUU: AISE Steel Foundation.
- Chinarailcart.com. (2014). *Cranes Applied in Steel Making-Henan Perfect Handling Equipment Co., Ltd.* [online] Disponible: <http://www.chinarailcart.com/news/243.html> [Acceso Jun. 2018].
- Durfee, W. (1890). *The Development of American Industries Since Columbus*. The Popular Science Monthly.
- Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (ETCF Arcelor Mittal Asturias). (2007). *El Proceso Siderúrgico*. Avilés.
- E. T. Turkdogan. (2010). *Fundamentals of Steelmaking*. 1ª ed. Leeds: Maney Publishing.
- González, C. (2015). *Siderurgia Integral*. [online] Siderurgiaintegral.blogspot.com. Disponible: <http://siderurgiaintegral.blogspot.com> [Acceso Jun. 2018].
- González Baquet, I. (sin publicar). *Introduction to Ironmaking Technologies*.
- I Love My Architect. (2010). *Bessemer Converter*. [online] Disponible: <https://ilovemyarchitect.com/2010/11/29/bessemer-converter/> [Acceso Jun. 2018].
- Museo de la Siderurgia y la Minería de Castilla y León. (s.f.). *Los Altos Hornos y la Ferrería*. [online] Disponible: <http://www.museosm.com/proceso.html> [Acceso Jun. 2018].
- Palacios Reparaz, J., Arana Bilbao, J., Larburu Ereño, J. and Iniesta de Bricio, L. (2002). *La fabricación del acero*. Madrid: UNESID.

- STLfinder (2018). *Steel Mill Ladle* [online] Disponible: <https://www.stlfinder.com/?search=hotpot-ladle&page=2&params=IFRoaW5naXZlcnNiIFlvdW1hZ2luZSBNeU1pbmImYWN0b3J5IEN1bHRzM0QgUGluc2hhcGUgVHVyYm9zcXVpZCBTaGFwZXdheXMgR3JhYkNBRCBDR1RyYWRlciBUaHJIZWRpbmc=> [Acceso Jun. 2018].
- Steel University. (2011). *Simulación de la Metalurgia en el Convertidor LD, Guía del Usuario*. World Steel Association.
- Turner, T. and Roberts-Austen, W. (1908). *The Metallurgy of Iron*. C.Griffin & Company Limited, p.8.
- Villaflaña, T. (2005). *Procesos Productivos*. [online] Thomasvillafana.blogspot.com. Disponible: <http://thomasvillafana.blogspot.com/2005/07/produccion-del-hierro-y-el-acero-el.html> [Acceso Jun. 2018].
- World Steel Association. (2012). *The White Book of Steel*. [online] WorldSteel.org. Disponible: [https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7b406f65-3d94-4e8a-819f-c0b6e0c1624e/The+White+Book+of+Steel\\_web.pdf](https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7b406f65-3d94-4e8a-819f-c0b6e0c1624e/The+White+Book+of+Steel_web.pdf)
- Zdenek, A. (2014). *Technology of production of steel in converters*. 1st ed. Ostrava: Technical University of Ostrava.