Funcionamiento y Simulación de un Horno Alto

PABLO GARCÍA GARCÍA



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

Funcionamiento y simulación de un horno alto

Autor: Pablo García García
Tutor: Francisco Blanco Álvarez

Oviedo, julio de 2017

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS 4
ÍNDICE DE TABLAS 6
INTRODUCCIÓN 7
OBJETIVOS 8
1. EL ACERO 9
1.1 Tipos de acero 11
1.1.1 Aceros bajos en carbono 11
1.1.2 Aceros de contenido medio en carbono 12
1.1.3 Aceros de contenido alto en carbono 12
1.1.4 Aceros de baja aleación 12
1.1.5 Aceros inoxidables 13
1.2 Producción de acero en el mundo 13
2. PROCESO SIDERÚRGICO INTEGRAL 16
2.1 Esquema del proceso siderúrgico integral 18
2.2 Antecedentes históricos 19
2.2.1 China 19
2.2.2 Europa 19
2.2.3 Hornos altos de coque 20
2.3 Hornos altos modernos 21
3. DESCRIPCIÓN DEL HORNO ALTO 22
3.1 Partes del horno 25
3.1.1 Tragante 25
3.1.2 Cuba 26
3.1.3 Vientre 27
3.1.4 Etalajes 27
3.1.5 Crisol 28

3.1.6 Piqueras 29
3.2 Sangrado del horno 29
3.3 Instalaciones complementarias 30
3.3.1 Inyección de viento 30
3.3.2 Estufas Cowper 31
3.3.3 Anillo de viento y toberas 32
3.3.4 Sistema de refrigeración 33
3.4 Inyección de carbón pulverizado 34
3.5 Química del proceso 35
3.6 Funcionamiento ideal de un horno alto. Diagrama de Rist. 38
3.7 ULCOS 42
3.7.1 Top Gas Recycling 43
3.7.2 HIsarna 43
3.7.3 ULCORED 44
3.7.4 Alkaline Electrolysis 44
3.8 Elementos presentes en el arrabio 44
3.8.1 Fósforo 45
3.8.2 Arsénico 45
3.8.3 Azufre 46
3.8.4 Manganeso 46
3.8.5 Silicio 47
3.8.6 Plomo 48
3.8.7 Zinc 48
3.8.8 Sodio y potasio 48
3.9 La escoria en el horno alto 49
3.9.1 Basicidad de la escoria 50
3.9.2 Formación de la escoria 51

3.9.3 Procesamiento de la escoria 52
3.9.4 Aplicaciones 53
3.10 Balance de masa en el horno alto 53
3.10.1 Consumo 53
3.10.2 Productos 54
3.11 Afino del arrabio 54
3.12 Colada en lingotera 55
3.13 Colada continua 56
3.14 Control operativo del alto horno 57
3.15 Ventajas del horno alto 58
3.16 Desventajas del horno alto 59
4. SIMULACIÓN DE UN HORNO ALTO 60
4.1 Introducción 60
4.2 Objetivos de la simulación 62
4.2.1 Arrabio para fundiciones 62
4.2.2 Arrabio para aceros 62
4.3 Primera simulación 63
4.3.1 Parámetros de la simulación 63
4.3.2 Pantalla de trabajo 67
4.3.3 Pantalla de resultados 73
4.4 Segunda simulación 79
4.5 Tercera simulación 81
CONCLUSIONES 83
GLOSARIO DE TÉRMINOS 84
BIBLIOGRAFÍA 86

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Puente de acero. 9
Ilustración 2: Puerta de automóvil hecha de acero. 12
Ilustración 3: Utensilios de cocina fabricados con acero inoxidable. 13
Ilustración 4: Producción de acero en el mundo 1996 - 2016 (millones de toneladas). 14
Ilustración 5: Acería eléctrica. 17
Ilustración 6: Forja catalana. 20
Ilustración 7: Instalación de horno alto. 22
Ilustración 8: Coque. 23
Ilustración 9: Partes que forman el horno alto. 25
Ilustración 10: Tragante de doble campana (izquierda) y tragante Paul Wurth (derecha). 26
Ilustración 11: Vagón torpedo. 30
Ilustración 12: Estufas Cowper de un alto horno. 31
Ilustración 13: Toberas de un horno alto en la India. 33
Ilustración 14: Lanza inyectando carbón a través de una tobera del horno alto. 35
Ilustración 15: Divisiones térmicas y químicas de un horno alto ideal. 38
Ilustración 16: Diagrama de las reacciones químicas en el interior del horno alto. 40
Ilustración 17: Recta operativa del horno alto. 41
Ilustración 18: Fases del proceso de afino del arrabio en el convertidor LD. 55
Ilustración 19: De izquierda a derecha: slab, bloom y palanquilla. 56
Ilustración 20: Sala de control en una instalación de hornos altos. 58
Ilustración 21: Página web del programa de simulación. 60
Ilustración 22: Pantalla inicial del simulador. 63
Ilustración 23: Materiales que se cargarán al horno. 64
Ilustración 24: Contenido de la carga del horno. 65
Ilustración 25: Composición del recuperado. 66
Ilustración 26: Composición predeterminada del coque y el carbón. 67
Ilustración 27: Composición del fundente. 67
Ilustración 28: Temperaturas modificables. 69
Ilustración 29: Propiedades del aire caliente inyectado. 69
Ilustración 30: Adiciones de gas (%). 69
Ilustración 31: Pantalla principal de la simulación. 70

Ilustración 32: Adiciones de gas al horno. 71
Ilustración 33: Composición del fundente utilizado. 71
Ilustración 34: Composición de la carga del horno. 72
Ilustración 35: Aspectos a optimizar. 73
Ilustración 36: Cantidad de combustible que entra al horno. 73
Ilustración 37: Composición del arrabio y de la escoria, costes y rendimientos. 74
Ilustración 38: Balances de masa y de calor. 75
Ilustración 39: Resultados finales de la simulación. 77
Ilustración 40: Ajustes del proceso de la segunda simulación. 79
Ilustración 41: Resultados de la carga de la segunda simulación. 79
Ilustración 42: Rendimiento de la segunda simulación. 80
Ilustración 43: Adiciones de gas de la tercera simulación. 81
Ilustración 44: Ajustes del proceso de la tercera simulación. 81
Ilustración 45: Fundente añadido al horno. 82
Ilustración 46: Resultados de la carga de la tercera simulación. 82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de la producción mundial de acero en el primer cuatrimestre. .. 14
Tabla 2: Análisis de la composición típica del coque introducido al horno alto. 22
Tabla 3: Composición típica de una escoria de horno alto. 52
Tabla 4: Posibles aplicaciones para la escoria de alto horno. 53
Tabla 5: Intervalos límite de los parámetros relacionados con la producción. 68
Tabla 6: Parámetros del balance de masa. 76
Tabla 7: Parámetros del balance de calor. 76
Tabla 8: Índices estándar para la evaluación del rendimiento de producción. 78
Tabla 9: Comparación de rendimientos entre las dos simulaciones. 80

INTRODUCCIÓN

Los hornos altos constituyen actualmente el método más común a la hora de producir arrabio a partir de mineral de hierro y otros materiales. De esta forma, es una ruta indispensable a la hora de obtener acero.

El proceso de los altos hornos tiene su origen muchos siglos atrás, y constituyen una muestra más de la impresionante evolución industrial que ha tenido lugar en el mundo de la metalurgia. Comenzando siendo hornos simples que utilizaban carbón vegetal como combustible, vieron mejorada su eficiencia, primero, sustituyendo dicho material por coque en el siglo XVIII y, posteriormente, introduciendo la gran novedad del precalentamiento del viento inyectado, ya en el siglo XIX, convirtiéndose en los potentes reactores que son actualmente.

Existen varios aspectos importantes para lograr un arrabio como producto final de buena calidad. Por ejemplo, la carga de las materias primas al horno no se efectúa aleatoriamente, sino que debe formar una estructura similar a una columna, originando capas alternativas de coque y mineral de hierro, de forma que el aire inyectado puede atravesar dichos materiales. Otro parámetro del que depende el éxito del proceso es la temperatura a la que se produce la colada del metal fundido, no debiendo permitir que esta baje de los 1.480 °C.

Hoy en día, todos estos controles se llevan a cabo mediante modernos y potentes sistemas informáticos, que regulan y supervisan el correcto funcionamiento de la instalación completa del alto horno. Otro ejemplo más del uso de tecnología punta en el mundo de la ingeniería.

OBJETIVOS

El acero es uno de los materiales estructurales más importantes en el mundo. Se podría decir que es utilizado, virtualmente, en todos los sectores, desde el del automóvil, la construcción, ingeniería mecánica o naval, electrodomésticos, ordenadores o aparatos electrónicos, tan en auge hoy en día.

Los proyectos de infraestructuras, tales como carreteras, puentes o ferrocarriles serían inviables sin el acero. Cuando un aparato no contiene este material como componente mayoritario (como pueden ser los smartphones, ordenadores o aviones), está hecho con componentes fabricados con máquinas hechas de acero. En otras palabras, el acero es esencial e indispensable para el alto nivel del mundo desarrollado y para el crecimiento de las economías emergentes.

Siendo uno de los procesos más importantes y usados en la fabricación del acero el proceso siderúrgico en los hornos altos, se ha querido realizar este proyecto para poner énfasis en esta tecnología a veces infravalorada, pero tan importante para el desarrollo mundial.

Asimismo, este Trabajo de Fin de Máster sobre los hornos altos es el complemento ideal para el Trabajo de Fin de Grado realizado anteriormente, que versó sobre los hornos de arco eléctrico. Junto a él, hemos aumentado notablemente el entendimiento del funcionamiento de estos dos tipos de procesos de fabricación de acero.

1. EL ACERO

El acero es una aleación de hierro y carbono en unas proporciones determinadas. El contenido de carbono debe estar comprendido entre un 0,008 % y un 2,11 %, aunque este intervalo es muy general; de hecho, hay ocasiones, y según las aplicaciones que se le vayan a dar al acero, en las que por encima del 1 % en carbono, este ya se considera como impureza. Por tanto, de manera general, las aleaciones por debajo del 0,008 % se consideran hierro puro y por encima del 2,11 % fundiciones.



Ilustración 1: Puente de acero.

En muchas aplicaciones, el acero realiza una importante contribución a la hora de preservar recursos y rebajar las emisiones. Por ejemplo, en la industria del automóvil, los productores europeos de acero han desarrollado un amplio rango de aceros de alta resistencia que permiten diseñar carrocerías de coches usando materiales más finos. Estos, por lo tanto, son más ligeros y hacen los vehículos más eficientes en cuanto al combustible a la vez que mantienen los altos niveles de seguridad y un alto nivel de reciclaje.

El acero se puede reciclar de manera indefinida y es, por lo tanto, un material amigo del medioambiente. El acero usado se puede utilizar para fabricar acero nuevo sin perder calidad. Por ejemplo, Europa actualmente recicla más del 90 % del acero usado en automóviles. Sin embargo, el consumo de acero reciclado se encuentra limitado por su disponibilidad. El acero se mantiene en uso en productos duraderos e infraestructuras por largos periodos de tiempo (*Ilustración 1*) y no existe en estos momentos chatarra suficiente disponible para abastecer la demanda.

La industria del acero también tiene una larga tradición en el manejo de energía sostenible: el gas caliente producido en los hornos altos durante la fusión del mineral de hierro y otros gases producidos se han venido usando para generar energía destinada a otras fases de producción desde el siglo XIX.

En la industria de la energía, el acero es un material indispensable en las turbinas de los molinos de viento, en los sistemas de energía solar y en las centrales de energía hidráulica, lo que contribuye a la producción de energías renovables. En cuanto al transporte y la distribución de la electricidad, grados especiales como el acero eléctrico asegura un porcentaje de eficiencia del 99 %.

En general, las características más importantes de este material se podrían resumir en las que exponemos a continuación:

- Es un material muy tenaz, dúctil y maleable.
- Su densidad media es de 7.850 kg/m^3.
- El punto de fusión depende del tipo de aleación. El del hierro, su componente principal, es de 1.510 °C en estado puro, mientras que el del acero ronda los 1.375 °C, aumentando esta cifra a medida que aumenta el porcentaje de carbono y otros elementos.
- Su punto de ebullición ronda los 3.000 °C.
- Se puede soldar con facilidad.
- Se caracteriza por tener una alta conductividad eléctrica.
- Se utiliza para la fabricación de imanes permanentes artificiales, ya que una pieza de acero imantada no pierde su imantación si no se calienta hasta cierta temperatura.
- Un aumento de la temperatura en un elemento del acero provoca un aumento en la longitud del mismo. El acero se dilata y se contrae según un coeficiente de dilatación similar al del hormigón, por lo que resulta muy útil su uso simultáneo en la construcción, formando un material compuesto denominado hormigón armado.
- Bajo coste unitario. Por ejemplo, para conseguir que el aluminio obtenga prestaciones equivalentes, este es 2,8 veces más caro que el acero.
- Alta disponibilidad, siendo su producción 20 veces superior a la totalidad del resto de los materiales metálicos no férreos. Su elemento básico, el hierro,

conforma alrededor del 5 % de la corteza terrestre, siendo una materia prima de suministro seguro.

1.1 Tipos de acero

Variando la temperatura o contenido en carbono de las aleaciones, el material cristalizará de manera distinta obteniendo distintas propiedades.

A medida que se aumenta la temperatura, el hierro es víctima de cambios en su estructura previamente a fundirse; de esta manera, a temperatura ambiente se presenta en forma estable (Ferrita Fe α). Cuando la temperatura alcanza los 912 °C, la ferrita se transforma y forma Austenita (Fe γ). Si la temperatura continúa aumentando, hasta los 1.394 °C, se obtiene Ferrita δ, que tiene un punto de fusión de 1.538 °C.

El comportamiento del metal también se ve afectado por el contenido en carbono, ya que este se disuelve en el hierro formando distintas estructuras. En la ferrita, dada la estructura cristalina del carbono, se puede situar poca cantidad, como máximo 0,022 % a 727 °C. La austenita, por otro lado, varía la estructura cristalográfica con respecto a la ferrita, por lo que tiene una solución máxima de carbono del 2,11 % a 1.148 °C. Cuanto más se aumenta el contenido en carbono, más se aproxima la estructura a la de la cementita, punto en el que el hierro es capaz de disolver un 6,67 % de carbono. Todos estos cambios estructurales pueden verse representados en el Diagrama Hierro-Carbono.

En función de su contenido en carbono, los aceros y fundiciones pueden clasificarse de la siguiente manera:

1.1.1 Aceros bajos en carbono

Son los más frecuentes y contienen entre un 0,008 % y un 0,25 % en peso de carbono. Estos aceros presentan una buena ductilidad y tenacidad, pero una resistencia baja, siendo relativamente blandos.

Entre sus aplicaciones principales está la fabricación de vigas, carrocerías de automóviles (*Ilustración 2*), raíles de ferrocarril, etc. Se puede elevar su resistencia aleándolos con otros metales. Presentan facilidad de mecanizado, buena soldabilidad y un bajo coste.



Ilustración 2: Puerta de automóvil hecha de acero.

1.1.2 Aceros de contenido medio en carbono

Presentan un contenido en carbono de entre el 0,25 % y el 0,6 %. Tienen su aplicación en campos en los que se requieren resistencias mayores que las que aportan los aceros de bajo contenido en carbono. Presentan, sin embargo, menor ductilidad y maleabilidad.

Se utilizan en la fabricación de máquinas tales como cigüeñales, partes de motores, acoplamientos, pernos, etc. Al añadirles ciertos materiales, se puede mejorar su capacidad de recibir tratamientos térmicos.

1.1.3 Aceros de contenido alto en carbono

Son aceros con contenidos que superan el 0,6 % de carbono. Son utilizados cuando se requiere una elevada resistencia, rigidez y dureza. Se pueden alear con otros materiales para fabricar herramientas de cortadura.

1.1.4 Aceros de baja aleación

Son aceros que contienen elementos metálicos no residuales aleados en menos del 5 % en peso. Este tipo de aleaciones tienen como fin mejorar las propiedades mecánicas del tipo de acero al que se han aleado. La mejora de estas propiedades permite mejorar la resistencia, ductilidad, dureza en caliente, resistencia al desgaste o tenacidad en distintas combinaciones. Para ellos se emplean metales como el cromo, vanadio, manganeso, molibdeno y níquel.

1.1.5 Aceros inoxidables

Son aceros que, aleados con otros metales, presentan una elevada resistencia a la corrosión (*Ilustración 3*). El metal que por excelencia dota al acero de esta característica es el cromo, gracias a su elevada afinidad por el oxígeno, agente corrosivo con el que reacciona el cromo para formar una capa protectora. Esta capa actúa como una película que aísla al hierro del oxígeno, reduciendo la reacción química de oxidación. También se pueden emplear otros elementos para mejorar las prestaciones contra la corrosión, como el níquel o el molibdeno.



Ilustración 3: Utensilios de cocina fabricados con acero inoxidable.

1.2 Producción de acero en el mundo

En 2016, la empresa que lideró la producción de acero en el mundo fue Arcelor Mittal, con más de 95 millones de toneladas. El liderazgo de Arcelor en este sector queda claro viendo el número de toneladas de la segunda empresa que más acero produjo el año pasado, China Baowu Group (nueva compañía formada por la fusión de Baosteel Group y Wuhan Group), 63,8 millones.

La producción mundial de acero crudo en 2016 fue de 1.628 millones de toneladas (*Ilustración 4*), un 0,8 % más que en 2015, según la Asociación Mundial del Acero (World Steel Association). En general, el informe dice que la producción disminuyó en Europa, América y África, y aumentó en los países de la antigua Unión Soviética, Asia y Oceanía.

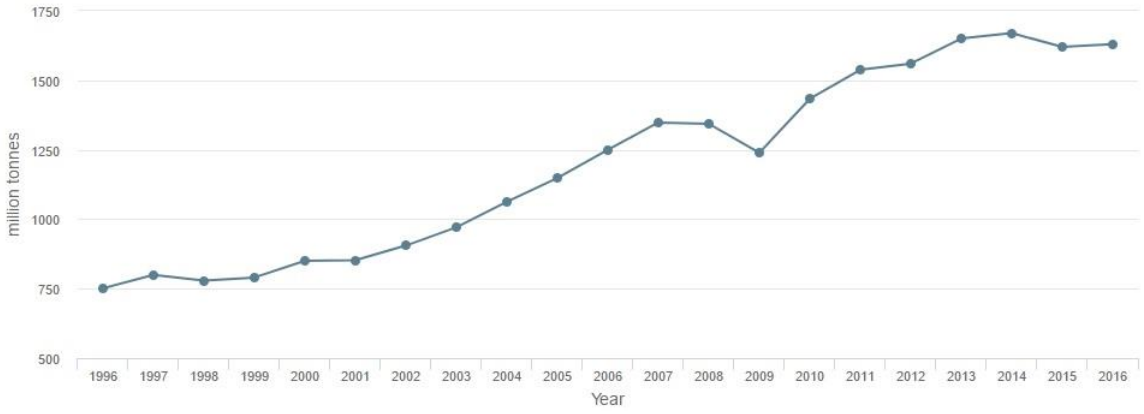


Ilustración 4: Producción de acero en el mundo 1996 - 2016 (millones de toneladas).

En concreto, en China la producción aumentó un 1,2 % con respecto a 2015, hasta los 808,4 millones de toneladas. Uno de los mayores aumentos fue el de India, 95,6 Mt, un 7,4 % más.

Por otro lado, la Unión Europea produjo un 2,3 % menos que en 2015, 162,3 millones de toneladas. España produjo 13,7 Mt de acero bruto en 2016, una disminución del 0,8 %. Ucrania registró un aumento del 5,5 %, hasta los 24,3 Mt.

En cuanto a América, EEUU produjo prácticamente lo mismo que en 2015, 78,6 millones de toneladas, mientras que América del Sur disminuyó su producción un 10, 6 %, empujados sobre todo por la caída del 9,2 % de la producción en Brasil.

Es destacable que en lo que llevamos de año se puede apreciar un aumento considerable de la producción del acero en el mundo, como se puede apreciar en la *Tabla 1*, concretamente, en abril, un 5 % más que en el mismo mes en 2016. En marzo, España alcanzó 1,4 Mt de acero bruto, un 15,7 % más que en el mismo periodo de 2016, y en abril 1,2 Mt, un 2,8 % menos que en abril de 2016.

Tabla 1: Comparación de la producción mundial de acero en el primer cuatrimestre.

País	Enero – Abril 2016 (millones de toneladas)	Enero – Abril 2017 (millones de toneladas)
China	261,1	273,9
Japón	34,3	35
India	31	33,2
EEUU	26,3	27

Rusia	23,2	24
Corea del Sur	22,1	22,8
Alemania	14,3	14,8
Turquía	10,5	11,8
Brasil	9,7	11,1
Italia	7,9	8,1
Taiwán	7,1	7,4
Ucrania	8,3	7,1
México	8,3	6,7
Irán	5,6	6,4
Francia	4,7	5,2
España	**4,8**	**4,8**
Canadá	4,4	4,6
Polonia	3	3,3
Bélgica	2,6	2,6

2. PROCESO SIDERÚRGICO INTEGRAL

Existen dos rutas posibles en la industria de la fabricación del acero: en la acería eléctrica se parte principalmente de chatarra, que se introduce en un horno de arco eléctrico y, en un solo paso, se consigue ya acero, que posteriormente se somete a tratamientos de transformación, y el proceso siderúrgico integral.

En el proceso siderúrgico integral se parte de mineral de hierro, carbón y fundentes. Estas materias primas necesitan una preparación para poder ser empleadas en la fabricación del acero. En el caso del mineral de hierro, la preparación consiste principalmente en obtener un tamaño adecuado del material y en aumentar su pureza. El carbón necesita pasar por un proceso de destilación seca y aglomeración para obtener coque.

El hierro no se presenta como elemento puro en la naturaleza, sino que los minerales de hierro que se obtienen de los yacimientos son óxidos de hierro (hematites, magnetita, limonita, siderita, pirita, etc.). Para fabricar acero es necesario eliminar el oxígeno, es decir, reducir estos óxidos. Este proceso se lleva a cabo en el horno alto y el coque es el elemento reductor empleado. Del horno alto se obtiene el arrabio, es decir, hierro ya sin oxígeno, pero con un exceso de carbono. El arrabio contiene además otros elementos por lo general no deseados, como pueden ser el azufre o el fósforo.

En la acería (*Ilustración 5*) se recibe el arrabio procedente del horno alto y se transforma en acero, eliminando el exceso indeseado de carbono en el convertidor. Mediante tratamientos de metalurgia secundaria se ajusta su composición y por último se solidifica en desbastes largos de sección constante. Estos desbastes pasan finalmente a laminación, donde se transforman en productos finales ya listos para su comercialización.

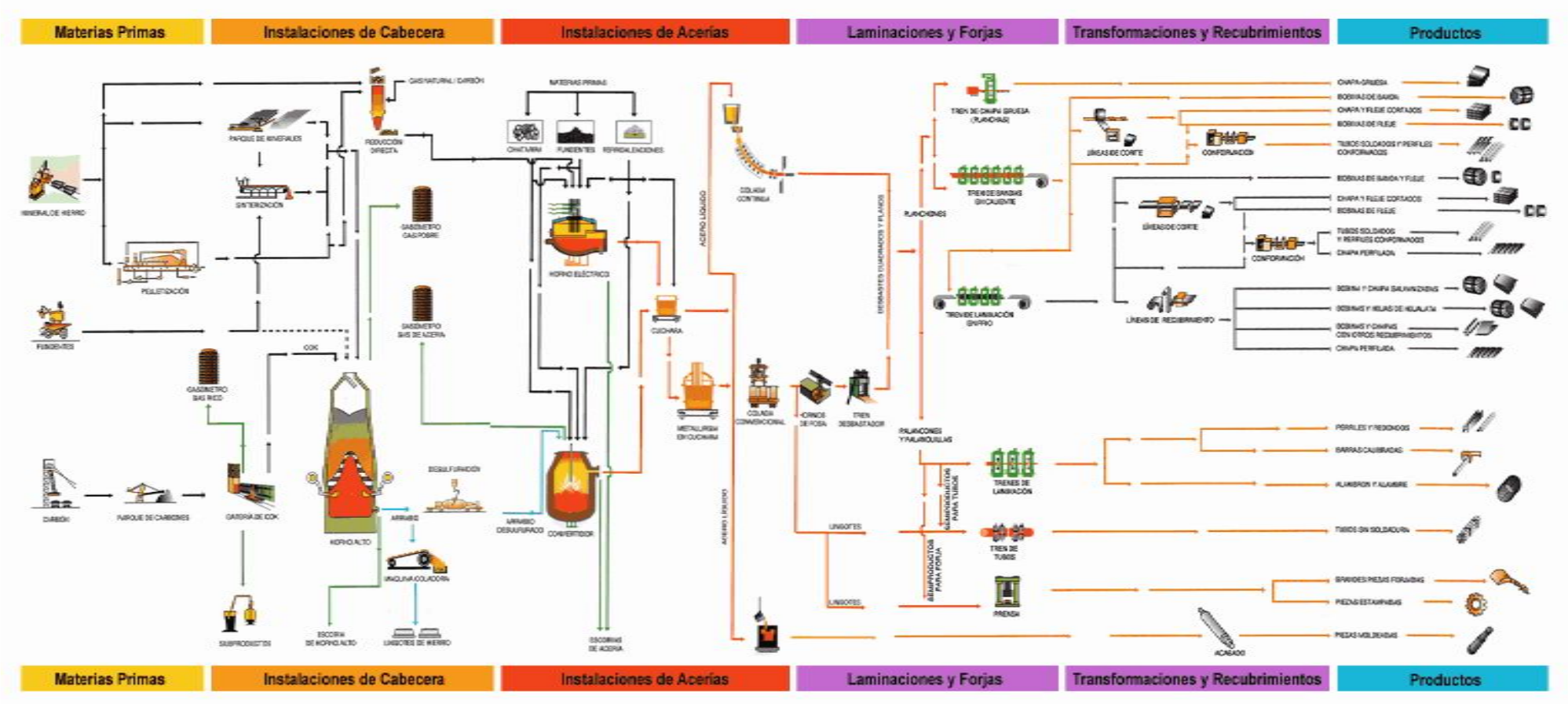


Ilustración 5: Acería eléctrica.

Las primeras materias del proceso siderúrgico integral son las descritas a continuación:

- Mineral de hierro: ya pretratado y concentrado en el yacimiento y la planta de tratamiento.
- Carbón: hará las funciones de agente reductor de los óxidos de hierro y de combustible y soporte físico de la carga en el horno alto.
- Fundentes: compuestos que tienen una doble finalidad: atrapar las impurezas que contiene el mineral y reducir su punto de fusión para formar la escoria.

2.1 Esquema del proceso siderúrgico integral



2.2 Antecedentes históricos

Los hornos altos surgieron en China alrededor del siglo I d.C. y en Occidente durante la Edad Media. Se extendieron desde la región de Namur, en la Región Valona (Bélgica) a finales del siglo XV, introduciéndose en Inglaterra en 1491. El combustible usado en estas primeras instalaciones era siempre carbón vegetal. La exitosa sustitución de este por el coque se suele atribuir a Abraham Darby en 1709. La eficiencia del proceso fue posteriormente mejorada introduciendo una fase de precalentamiento del aire de combustión, patentado por James Beaumont Neilson en 1828.

2.2.1 China

Los hornos altos más antiguos fueron construidos durante la dinastía Han en China en el siglo I d.C. Sin embargo, las herramientas agrícolas y las armas de fundiciones de hierro se extendieron por el país ya en el siglo V a.C. y los trabajadores del hierro fundido formaban grupos de 200 personas en el siglo III a.C.

Estos primeros hornos contaban con paredes de arcilla y usaban minerales derivados del azufre como fundentes. La eficiencia de los hornos altos chinos fue mejorada durante esta época por el ingeniero Du Shi, quien aplicó la potencia de la rueda hidráulica a los fuelles en la forja de las fundiciones de hierro.

2.2.2 Europa

La forja surgida en Cataluña durante el siglo VIII, en lugar de usar una corriente de aire natural, bombeaban el aire a través de una trompa de agua (*Ilustración 6*), aprovechando la caída del agua para comprimir el aire, obteniendo una mejor calidad en el hierro y una mayor capacidad.

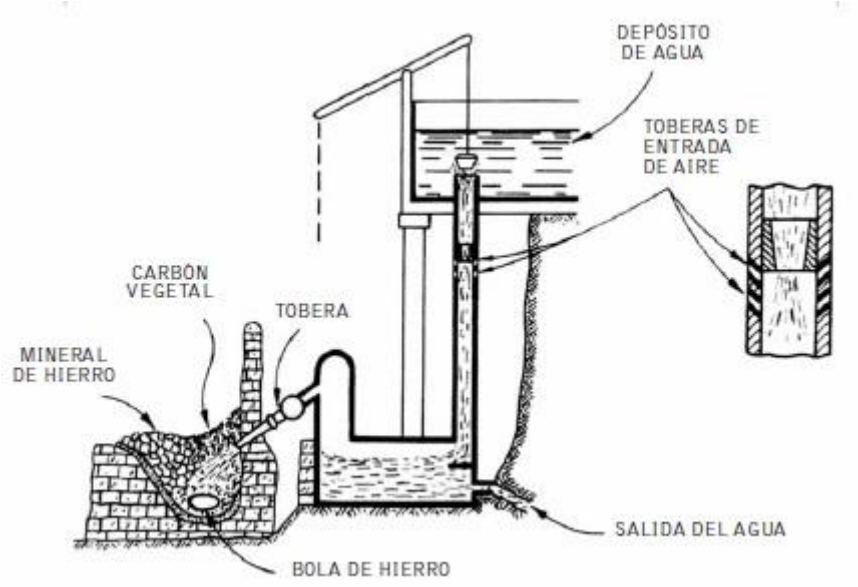


Ilustración 6: Forja catalana.

2.2.3 Hornos altos de coque

En 1709, en Shropshire, Inglaterra, Abraham Darby comenzó a alimentar un horno alto con coque en vez de carbón vegetal. La primera ventaja de este nuevo combustible era su menor coste, principalmente porque hacer coque requería mucho menos esfuerzo que talar árboles y conseguir carbón vegetal, pero además se podían sobreponer a la escasez de madera en algunas zonas. El coque válido para la metalurgia tendrás más peso que el carbón vegetal, permitiendo utilizar por tanto hornos más grandes. Como desventaja cabe destacar el mayor número de impurezas que trae consigo el coque con respecto al carbón vegetal, siendo el azufre el elemento que más perjudica a la calidad del hierro.

El coque se utilizaba inicialmente solo en la industria de fundiciones, haciendo potas y otros utensilios de fundición. El hijo de Darby construyó un nuevo horno y comenzó a suministrar a los propietarios de forjas de fundiciones arrabio de coque para la producción de barras de hierro. El arrabio de coque era en aquella época más barato de producir que el arrabio de carbón vegetal. El uso de un combustible derivado del carbón en la industria del hierro fue un factor fundamental en la Revolución Industrial.

El hierro fundido producido de este nuevo horno se usó para hacer las vigas del primer puente de hierro del mundo en 1779. Se trata del puente de Hierro, en Coalbrookdale, y aún se encuentra en uso en la actualidad.

2.3 Hornos altos modernos

El horno alto es un tipo de horno metalúrgico cuyo funcionamiento se basa en la fusión para producir metales industriales, generalmente hierro, pero también otros como plomo o cobre.

En un horno alto, el combustible, el mineral y el fundente (caliza) se introducen de manera continua por la parte superior del horno, a la vez que una fuerte corriente de aire caliente (a veces enriquecido con oxígeno) se inyecta en la parte inferior del horno a través de una serie de tuberías llamadas toberas; de esta forma, las reacciones químicas tienen lugar por todo el horno a medida que el material se mueve en sentido descendente. Los productos finales son normalmente metales fundidos y fases de escoria que se vacían por abajo, y gases de escape que se expulsan por arriba. El flujo descendente del mineral y el fundente en contacto con el ascendente de los gases calientes de combustión ricos en monóxido de carbono constituye un intercambio por contracorriente y un proceso de reacción química.

El término horno alto suele estar limitado a aquellos usados para la fusión de mineral de hierro con el fin de producir arrabio, un material intermedio usado en la producción de hierro comercial y acero.

La función del horno alto es eliminar el oxígeno del mineral de hierro para obtener como producto final el llamado arrabio, una aleación de hierro y carbono aún en estado líquido, que por lo general contiene entre un 3,5 y un 4,5 % de carbono.

3. DESCRIPCIÓN DEL HORNO ALTO

El horno alto es un reactor vertical de cuba (*Ilustración 7*) en el que tiene lugar el proceso de reducción de los minerales, obteniéndose arrabio, producto intermedio en la fabricación del acero. Este arrabio deberá ser tratado fuera del horno, usualmente en una planta de desulfuración, antes de su afinado en la acería LD.



Ilustración 7: Instalación de horno alto.

La carga sólida se introduce por la parte superior del horno alto. Está constituida por minerales de hierro, fundentes, coque y, en algunas ocasiones, ferroaleaciones necesarias para ajustar la composición deseada en el arrabio.

A continuación, se muestra una composición (*Tabla 2*) que podría considerarse típica del coque que se introduce en el horno alto:

Tabla 2: Análisis de la composición típica del coque introducido al horno alto.

Análisis de un coque típico		Porcentaje (%)
Análisis del coque	Carbono	87 – 92
	Nitrógeno	1,2 – 1,5
	Cenizas	8 – 11
	Azufre	0,6 – 0,8
	Materia volátil	0,2 – 0,5
Análisis de las cenizas	Sílice (SiO_2)	52
	Alúmina (Al_2O_3)	31

	Hierro (Fe)	7
	Cal (CaO)	2,5
	Potasio (K_2O)	1,8
	Magnesio (MgO)	1,2
	Sodio (Na_2O)	0,7
	Fósforo (P)	0,3
	Manganeso (Mn)	0,1
	Zinc (Zn)	< 0,02

Vista la composición típica del coque, elemento indispensable para el funcionamiento del alto horno, vamos a definir ahora cómo caracterizar su calidad y medir sus propiedades. En otras palabras, cómo establecer un objetivo para la manufacturación del coque basada en la determinación de sus propiedades, así como con las necesidades del proceso del alto horno.

Dicho esto, los siguientes parámetros deben considerarse como los que limitan la degradación del coque y mantienen un comportamiento adecuado en el interior del horno, especialmente a altas tasas de inyección de carbón.



Ilustración 8: Coque.

Cualitativamente, el coque (*Ilustración 8*) debería:

- Estar compuesto por partículas grandes y estables.
- Tener una alta resistencia contra la rotura de volumen.
- Tener una alta resistencia contra la abrasión.

- Tener una alta resistencia contra ataques químicos (CO_2, álcalis).
- Tener una alta fuerza residual tras un ataque químico.
- Tener suficientes propiedades de carburación (la disolución del carbono en el metal caliente).

El tamaño medio de las partículas del coque es mucho mayor que el del resto de materiales que forman la carga. Además, el coque se mantendrá en estado sólido a lo largo del proceso del horno alto.

Para dicho proceso, las funciones más importantes del coque son las que se describen a continuación:

- Proporcionar la estructura a través de la cual el gas puede ascender y distribuirse por la columna de la carga. El coque es un material sólido y permeable incluso a altas temperaturas (> 2.000 °C). Por debajo de la zona de fusión, el coque es el único material sólido, por lo que el peso total del contenido del horno alto está soportado por la estructura de coque. Este colchón de coque debe ser necesariamente permeable, de modo que la escoria y el hierro puedan fluir hacia abajo, acumularse en la parte inferior y fluir por el agujero de sangrado.
- Generar calor para derretir la carga.
- Generar gases reductores.
- Proporcionar el carbono necesario para la carburación del metal caliente.
- Actuar como filtro para el hollín y el polvo.

Debido a esa mayor permeabilidad del coque sobre el mineral que forma la carga, esta no se introduce de manera aleatoria o uniforme por la parte superior del horno, sino que se hace de manera que se formen capas alternativas de coque y mineral. Al hacerlo así, el gas atraviesa la zona de reblandecimiento o cohesiva a través de las ranuras del coque.

En el horno alto se desarrolla un proceso de contracorriente entre la carga descendente y una corriente ascendente de gas reductor. Entre ambos flujos existe un intercambio térmico y químico, de manera que se tiene una salida de gas en la zona superior del horno y de arrabio y escoria en la parte inferior.

El gas reductor es producido en la zona inferior del horno mediante la combustión del coque y carbón pulverizado por el oxígeno del viento soplado a través de unas toberas.

En su ascenso, el gas calienta la carga sólida, que se va dilatando a medida que desciende por el horno hasta que al fin se hunde y su volumen disminuye. Por este motivo el horno tiene un perfil de dos troncos de cono unidos por su base mayor.

3.1 Partes del horno

A continuación, vamos a describir brevemente el aspecto y las funciones de las distintas partes que componen la estructura de un alto horno (*Ilustración 9*).

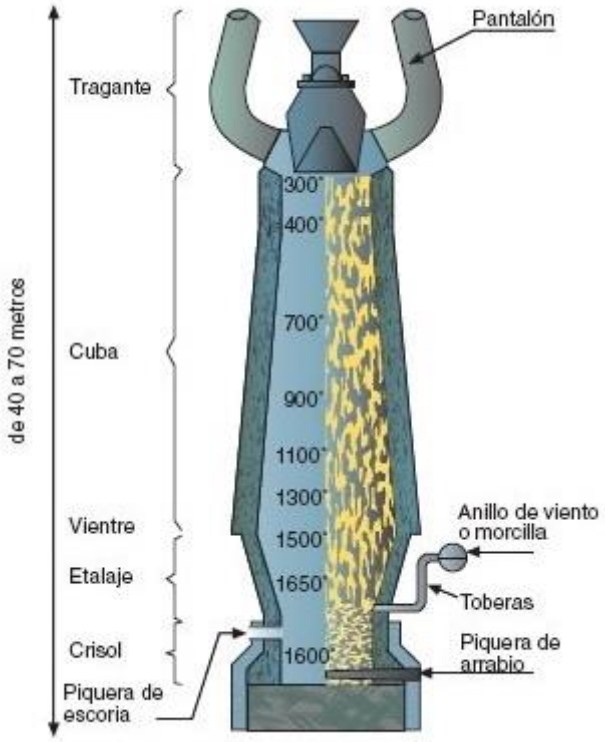


Ilustración 9: Partes que forman el horno alto.

3.1.1 Tragante

El tragante es la parte superior del horno, por donde se cargan el mineral de hierro, los fundentes y el coque. El dispositivo de carga debe garantizar la distribución uniforme del material y la estanqueidad, de forma que la emisión de gases sea mínima.

Del tragante salen dos o cuatro tubos, denominados “pantalones”, que tienen aproximadamente 2 metros de diámetro y que constituyen la salida de los gases. Estos pantalones desembocan en un tubo común, descendente, que conduce el gas de horno alto (o gas pobre) a los depuradores primarios y, posteriormente, a las instalaciones de lavado del gas.

La carga del horno se transporta hasta el tragante en vagonetas, que ascienden por skips o ascensores, o en cintas transportadoras, y se descargan en una tolva encima del horno. Es importante evitar la emisión de gases durante el proceso de carga o, lo que es lo mismo, que no exista comunicación directa entre el interior del horno y la atmósfera. Para ello se pueden emplear dos sistemas: la doble campana o el tragante Paul Wurth (*Ilustración 10*).

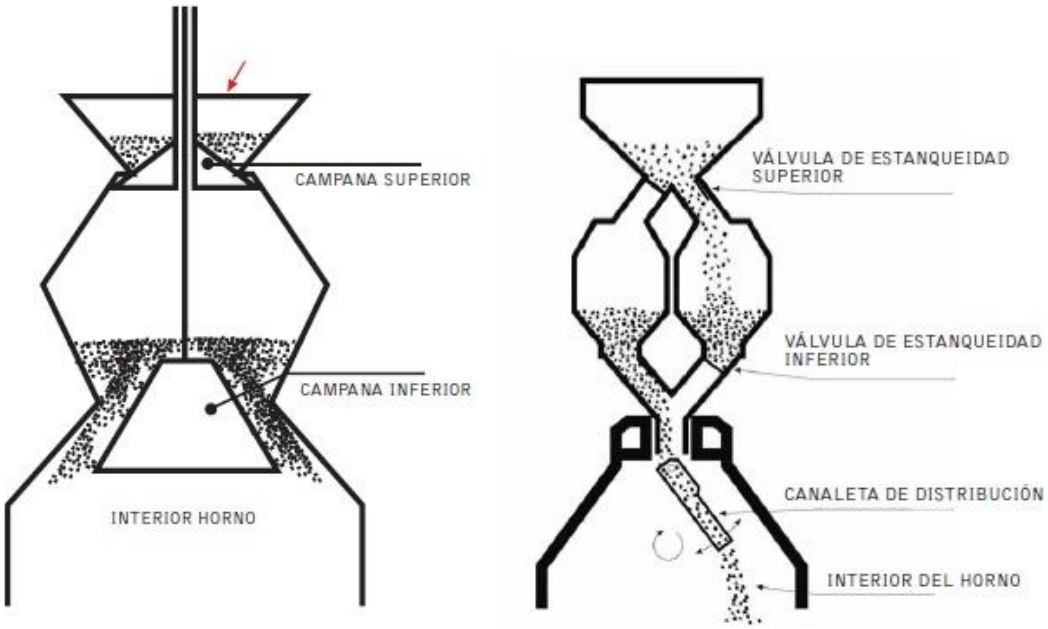


Ilustración 10: Tragante de doble campana (izquierda) y tragante Paul Wurth (derecha).

3.1.2 Cuba

Se denomina cuba al tronco de cono superior, a continuación del tragante, y cuyo diámetro mayor se encuentra en la parte inferior.

Es la zona de mayor volumen del horno alto. En la parte superior de la cuba, los materiales se van secando y calentando en contacto con el gas ascendente. En la parte inferior, donde la temperatura del gas es mayor, comienza la reducción del material a hierro.

Tradicionalmente, la cuba se fabricaba de chapa acorazada revestida interiormente de material refractario de hasta 1 metro de espesor; hoy en día se tienden a colocar "staves", un sistema de refrigeración, en toda la cuba con un recubrimiento de refractario de poco espesor.

El material refractario que se emplea en los hornos de mayor espesor del revestimiento son ladrillos silico-aluminosos, con contenido creciente en alúmina (Al_2O_3) a medida que se desciende. En la zona de precalentamiento el porcentaje de alúmina es de alrededor del 35 %; en la de reacción, de hasta el 60 %.

En el tercio superior, el refractario se encuentra protegido contra los golpes provocados por la carga del lecho de fusión por medio de una coraza cilíndrica de acero, llamada blindaje del tragante, de unos 3 o 4 metros de altura. El blindaje ejerce una importante influencia en la formación de la columna del lecho de fusión y, por tanto, en la marcha del horno.

En caso de que el tragante esté también refrigerado con staves, justo en la parte más alta se instalan ladrillos de SiC como protección contra el desgaste de los staves.

La distribución de temperaturas dentro del horno no varía uniformemente con la altura según secciones horizontales, sino que alrededor de la zona axial la temperatura será siempre la más elevada y decrecerá en dirección radial al acercarse a la pared.

3.1.3 Vientre

Es la parte de mayor diámetro, la zona de unión de los dos troncos de cono. Tiene forma de anillo cilíndrico, de entre 1 metro y 1,5 metros de altura. El recubrimiento de refractario en esta zona puede ser aproximadamente de 1,5 metros de espesor, aunque en la actualidad se suelen emplear staves y un revestimiento de menor espesor, al igual que en la cuba.

La reducción del mineral se completa en esta parte del horno, donde se alcanzan temperaturas de en torno a los 1.500 °C. La wustita se reduce finalmente a hierro, al reaccionar con el monóxido de carbono procedente de la combustión del carbono del coque con oxígeno en la zona de etalajes.

Se forma ya el arrabio que, junto con la escoria fundida, gotea hacia el crisol. El arrabio está constituido por un 94 % de hierro y un 4-5 % de carbono. El resto está formado por silicio, manganeso, fósforo y azufre, principalmente.

3.1.4 Etalajes

Es la zona situada justo debajo del vientre, formada por un tronco de cono invertido, es decir, con el diámetro mayor en la parte superior y el menor unido al crisol. En los hornos actuales los etalajes forman con el crisol ángulos de inclinación de hasta 80°.

Normalmente se emplean también staves y el revestimiento refractario en esta zona suele ser de ladrillos de alto contenido en alúmina o bien de semigrafito, por su buena conductividad térmica.

En esta parte del horno se inyecta aire o viento caliente, procedente de unas estufas de calentamiento, a través de unas toberas. Por estas toberas se realiza también la inyección de combustibles auxiliares.

El precalentamiento del aire introducido al horno fue el avance más importante para la eficiencia del combustible de los altos hornos y una de las tecnologías más importantes desarrolladas durante la Revolución Industrial. Este proceso fue patentado por James Beaumont Neilson en Escocia, en 1828. Tras unos años desde su introducción, este diseño fue desarrollado hasta el punto de reducir un tercio el consumo de combustible usando coque o dos tercios usando carbón, a la vez que la capacidad del horno fue también aumentada significativamente, al permitir usar mayores temperaturas. En las primeras décadas, el diseño consistía en una especie de estufa tan grande como el propio horno al lado de este, a donde el gas saliente del horno (conteniendo CO) era dirigido y quemado. El calor resultante se usaba para precalentar el aire soplado al interior del horno.

Este proceso permitió el uso de la antracita en el alto horno. Este combustible fue experimentado con éxito por primera vez por George Crane en Gales en 1837.

La zona de etalajes está rodeada de un gran tubo metálico en forma de anillo, denominado “morcilla”, del que salen varias tuberías, una a cada tobera. La morcilla está revestida interiormente con material refractario y aislante para evitar pérdidas de calor. Las toberas están colocadas equidistantes, de forma uniforme en el contorno de la zona de etalajes, formando el “anillo de toberas”.

En los grandes hornos altos (crisol de en torno a los 14 metros de diámetro) existen hasta 42 toberas distribuidas por las paredes de los etalajes. Por ellas se introduce el viento caliente a temperaturas en torno a los 1.200 °C.

3.1.5 Crisol

Es la parte inferior del horno, cilíndrica, donde se alojan el arrabio y la escoria que posteriormente, y de forma periódica, serán colados a través de las piqueras. Tiene un revestimiento de refractario de grafito, puesto que su conductividad térmica es muy

buena. Está circundado por una coraza gruesa de chapa de acero y refrigerado por una corriente de agua. También en el crisol existe la posibilidad de refrigerar por medio de staves.

Su dimensión, para hornos de una productividad de entre 4.000 y 6.000 toneladas diarias de arrabio, está en torno a los 2,5-3,5 metros de altura, por 9-10 metros de diámetro. En hornos de mayor capacidad (8.000-10.000 t diarias de arrabio) el diámetro del crisol puede alcanzar los 14-16 metros.

El diámetro del crisol es la dimensión que caracteriza a un horno alto. Su dimensionado se realiza en función del diámetro del vientre y de la altura y el ángulo del etalaje, que a su vez se calculan en función de otros parámetros. Básicamente, los parámetros de partida son los objetivos en cuanto a la producción y el consumo de combustible.

3.1.6 Piqueras

Las piqueras son unas aberturas perpendiculares, en forma de ranura, que se encuentran repartidas en varios puntos (2 o 3 piqueras generalmente; pueden llegar a ser 4 en hornos grandes) alrededor de la base del crisol. Por ellas se efectúa la colada del arrabio y, eventualmente, la escoria, estando la de esta un poco por encima de la del arrabio. La operación de colada del arrabio se denomina “sangrado”.

Las piqueras se encuentran revestidas de ladrillo de corindón (un mineral de aluminio, muy duro y resistente) y el hueco, de unos 50-80 mm de diámetro, de pasta refractaria de carbono.

3.2 Sangrado del horno

El proceso de sangrado consiste en retirar a golpes un tapón de arcilla del orificio del hierro cercano al fondo del horno y dejar que el metal fundido fluya por un canal cubierto de arcilla y caiga bien hacia las lingoteras, para obtener los lingotes de primera fusión al enfriarse, o bien a un depósito metálico forrado de ladrillo refractario para evitar que el arrabio se enfríe, que puede ser una cuchara o una vagoneta capaz de contener hasta 100 toneladas de metal (*(Ilustración 11).* Cualquier escoria o sobrante que salga del horno junto con el metal se elimina antes de llegar al recipiente. A continuación, el contenedor lleno de arrabio se transporta a la fábrica siderúrgica.



Ilustración 11: Vagón torpedo.

La periodicidad con que se llevan a cabo los sangrados del horno depende del régimen de marcha concreto. Actualmente, se podría decir que es casi continuo. En los hornos grandes, con 3 o 4 piqueras, se suelen sangrar dos a la vez.

3.3 Instalaciones complementarias

El horno alto requiere una serie de instalaciones complementarias, tales como tolvas, estufas, tratamiento del gas, inyección de combustibles auxiliares, así como equipos de transporte de arrabio y procesamiento de la escoria.

3.3.1 Inyección de viento

Como hemos visto, una de las operaciones indispensables en el funcionamiento del horno alto es la inyección de aire caliente a través de las toberas situadas en la zona de etalajes.

Para hacernos una idea del gran ahorro de combustible que supone esta operación, cabe decir que al quemar 1 kg de coque con aire a 1.000 °C se desprende tanto calor como al quemar 1,67 kg de coque con aire sin precalentar. Si además tenemos en cuenta el bajo coste de las estufas de aire caliente en relación con el precio del coque, el precalentamiento del aire soplado al horno para la combustión supone una gran reducción de costes. Además, para el precalentamiento del aire se emplea el propio gas de salida del horno, lo que constituye una ventaja adicional, aprovechando esa potencia calorífica que, de otra manera, se perdería. En los hornos actuales, la temperatura del viento inyectado ronda los 1.200-1.300 °C.

Generalmente, cada horno alto dispone de tres estufas de aire caliente alimentadas por una misma soplante. El aire que sale de las estufas se conduce hacia la morcilla y de ahí es distribuido a las toberas, que son las encargadas de inyectarlo al interior del horno. A la salida del horno, convertido en gas pobre, se efectúa la depuración de los gases y pasa de nuevo a las estufas para transmitir su calor al aire que es preparado para entrar en el horno.

3.3.2 Estufas Cowper

Junto al horno alto se disponen varias estufas (desde 2 hasta 4, según la instalación) para calentar el aire. Emplean como elemento intercambiador de calor el propio gas saliente del horno (gas de horno alto o gas pobre).

Tienen el aspecto de altos cilindros verticales terminados en un casquete semiesférico revestidos con chapa de acero exteriormente y con material refractario en el interior (*Ilustración 12*). La cavidad interior consta de una cámara de combustión y de la parrilla de ladrillos de refractario que acumula y cede calor (cámara de intercambio).



Ilustración 12: Estufas Cowper de un alto horno.

En la parte inferior de la cámara de combustión se encuentra la boca de entrada del gas y, un poco por encima de esta, una tubería por la que se inyecta el aire utilizado para quemar el gas del horno.

El gas procedente de las instalaciones de depuración entra en la estufa por la parte inferior y, al entrar en contacto con el aire inyectado por la tubería mencionada anteriormente, se quema. De esta forma, se producen unos humos de combustión que ascienden hasta la parte superior de la estufa, donde invierten su movimiento y bajan a través de los emparrillados de ladrillo, calentándolos. Estos humos pasan por un intercambiador de calor para calentar el gas y el aire que se emplean en la estufa en este ciclo de calentamiento.

A continuación, se corta este flujo y se inicia el ciclo de calentamiento del aire destinado al horno alto. El aire frío procedente de las soplantes entra a las estufas por el lado posterior y recorre los emparrillados de refractario en sentido contrario a como fueron calentados por el gas, es decir, de abajo hacia arriba, de este modo se consigue un calentamiento óptimo del aire. El flujo de aire atraviesa la cámara de mezcla, desde donde se conduce al anillo de toberas (morcilla). Aquí, se distribuye de manera uniforme el aire caliente a las toberas para su inyección en el horno.

Una serie de válvulas, colocadas a la entrada y salida de las estufas, regulan el flujo de aire y gas, pudiendo realizar in situ modificaciones necesarias para adaptarse a los requerimientos del ciclo del horno en cada momento.

Las estufas funcionan de manera alternativa, repitiéndose continuamente los ciclos descritos, por eso se llaman estufas de funcionamiento intermitente. Es por esto que cada horno cuenta con, al menos, de dos estufas Cowper. De esta forma, mientras en una se lleva a cabo el ciclo de calentamiento de los ladrillos intercambiadores de calor, la otra u otras están calentando aire, alcanzando temperaturas que pueden llegar a los 1.000 °C. Cada 20 minutos se invierte el ciclo en cada estufa.

3.3.3 Anillo de viento y toberas

Como se ha mencionado, a la altura de los etalajes están dispuestas una serie de toberas encargadas de inyectar el aire al horno de manera uniforme (*Ilustración 13*) y, a su vez, exteriormente a estas, encontramos la llamada “morcilla”, un tubo metálico circular que

recibe el viento que viene de las estufas. Como es lógico, el interior de la morcilla está revestido de refractario y aislante para evitar pérdidas de calor.

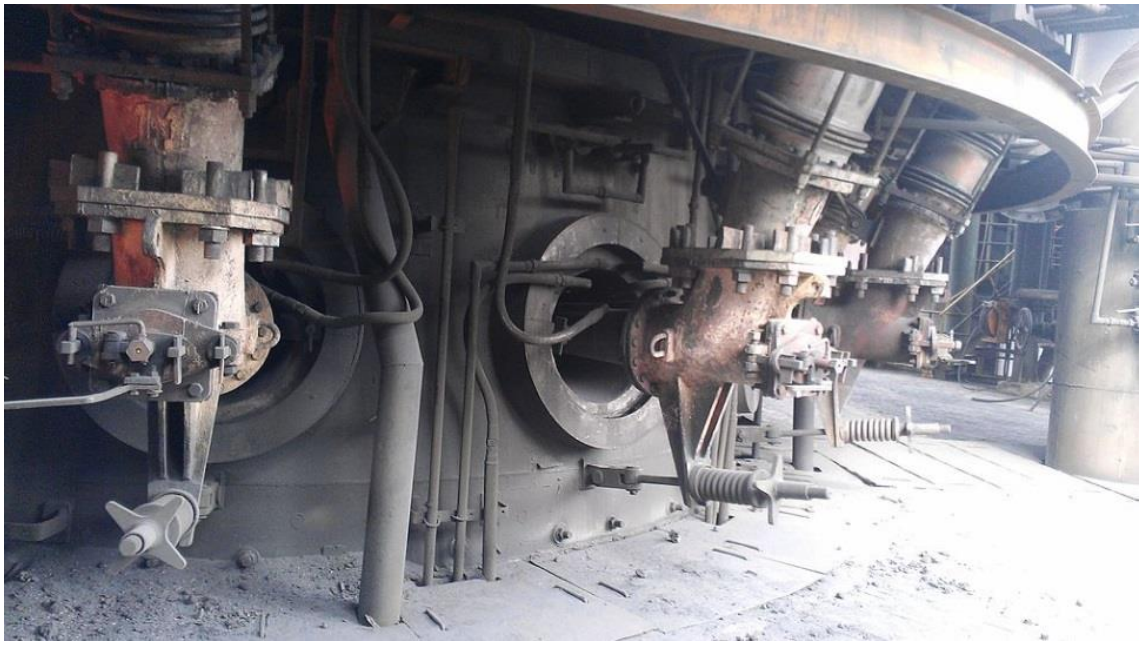


Ilustración 13: Toberas de un horno alto en la India.

El anillo de viento se encuentra separado del horno y de él parten las tuberías que desembocan en las toberas. Estas están repartidas uniformemente por la periferia del anillo. El viento caliente, a una temperatura superior a los 1.000 °C, es inyectado a una velocidad que ronda los 200-230 m/s.

3.3.4 Sistema de refrigeración

Las temperaturas alcanzadas por los gases del interior del horno alto pueden encontrarse en el rango de los 1.600-1.800 °C, por lo que se corre el riesgo de dañar el revestimiento de refractario. Por ello se emplea un sistema de refrigeración para enfriar las paredes del horno.

Como métodos de refrigeración en los hornos altos podemos citar el riego externo (sencillo, pero en desuso), la camisa de agua (usualmente se utiliza como refrigeración de refuerzo), cajas de refrigeración (su principal ventaja es que alcanzan el interior del refractario) y las placas de refrigeración o staves.

Esta última es una de las técnicas modernas; los staves solo cuentan con una capa de hormigón refractario de trabajo. De esta forma es posible aumentar el volumen interno

del horno, mejorando la productividad. Consisten en placas de fundición en las que se han empotrado tubos. Sus ventajas son:

- La captación de todos los flujos caloríficos emitidos por delante del blindaje, que no será atravesado por la corriente calorífica y por tanto se mantendrá frío.
- El reparto uniforme sobre la pared refractaria, sin salientes que entorpezcan el descenso de la carga, como ocurre en el caso de los revestimientos con cajas.
- El aumento del volumen interno del horno.

3.4 Inyección de carbón pulverizado

Es posible optar por la inyección de reductores auxiliares en el horno alto, como el carbón, el aceite o incluso el gas natural, con el fin de disminuir los costes del arrabio producido en la instalación. De los nombrados, el reductor más usado es el carbón, el cual consigue ahorros en el proceso al disminuir el consumo de coque, ya que al inyectar carbón se reduce la cantidad necesaria de coque. Además, permite usar temperaturas más elevadas en el viento caliente, lo que conlleva de nuevo a un menor consumo de coque. Por tanto, mediante la inyección de carbón en el horno alto se consigue una mayor productividad, al usar viento enriquecido con oxígeno.

Para que el carbón sea apto para su inyección en el horno, es necesario tratarlo en una serie de pasos:

- Trituración: para poder inyectar el carbón a través de las toberas debe triturarse hasta alcanzar tamaños pequeños. Generalmente, el carbón pulverizado que se usa tiene un 60 % de partículas por debajo de las 75 micras. El carbón granular es levemente más grueso, en torno a 1 o 2 mm.
- Secado: esta es una fase de preparación indispensable, pues el carbón suele tener entre un 8 y un 10 % de humedad.

Según el contenido en materia volátil que presente el carbón a inyectar, lo podemos clasificar en tres tipos: entre un 6 y un 12 % de materia volátil se clasifica como poco volátil, con un 12-30 % medio volátil y con más del 30 % se conoce como carbón rico en volátiles.

Para determinar el grado de calidad del carbón, se deben tener en cuenta las siguientes propiedades:

- Coeficiente de reemplazo: la cantidad de coque que es reemplazado por el carbón depende de la composición y del porcentaje de humedad.
- Composición: si el carbón presenta altos contenido en fósforo y azufre aumentarán los costes de tratamiento en la acería.
- Materia volátil: si se trata de un carbón rico en volátiles tendrá un coeficiente de reemplazo bajo, pero se gasificará fácilmente.
- Porcentaje de humedad: un carbón excesivamente húmedo podrá producir problemas de adherencia y manejo.

El carbón se inyectará en el horno alto en cantidades iguales a través de las toberas por medio de lanzas (*Ilustración 14*).

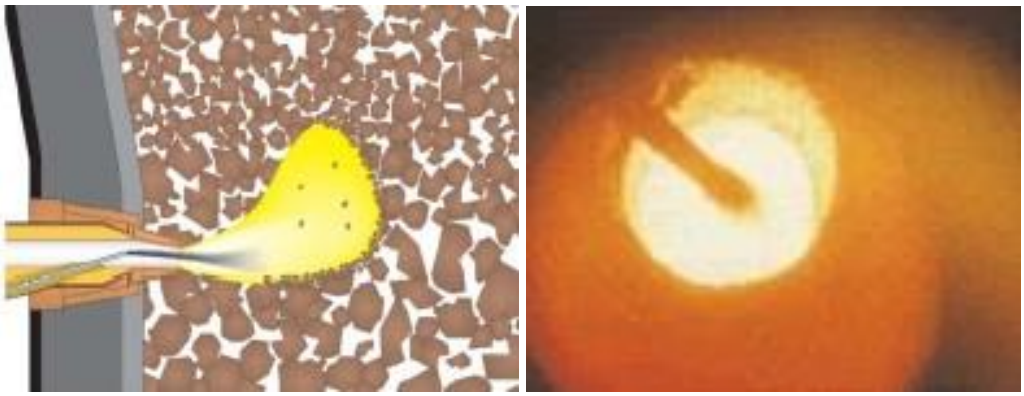


Ilustración 14: Lanza inyectando carbón a través de una tobera del horno alto.

Hay que tener en cuenta que la tasa de inyección de carbón puede también tener efectos negativos en el proceso operativo del horno alto. Así, a medida que dicha tasa aumenta, la permeabilidad del crisol disminuye y la cantidad de inquemados aumenta, pudiendo producir problemas de sangrado y retención de escoria.

3.5 Química del proceso

Los hornos altos operan bajo el principio de la reacción redox (reducción-oxidación), donde el monóxido de carbono, que tiene una mayor afinidad por el oxígeno del mineral de hierro que el propio hierro, lo reduce a su estado elemental. En el alto horno el gas se encuentra en contacto directo con el mineral y el hierro, permitiendo que el monóxido de carbono se difunda en el mineral y reduzca el óxido de hierro a hierro elemental mezclado con carbono. Los hornos altos operan como un intercambio a contracorriente. Otra característica es que operan de manera continua durante largos periodos debido a la

dificultad de su arranque y parada. Asimismo, el carbono en el arrabio baja el punto de fusión por debajo de el del acero o el hierro puro.

El monóxido de carbono también reduce el dióxido de silicio, el cual se debe eliminar del arrabio. Este óxido de silicio reacciona con el de calcio y forma una escoria que flota en la superficie del arrabio fundido. El contacto directo del gas con el hierro produce contaminación por azufre si está presente en el combustible. Históricamente, para prevenir la contaminación de azufre, la mejor calidad del hierro se conseguía con carbón vegetal.

El movimiento descendente de la columna formada por el mineral, el fundente, el coque o carbón vegetal y los productos que se forman debe ser lo suficientemente poroso para permitir que el aire fluya a través. Para ello es necesario que el coque o el carbón formen partículas grandes permeables, por lo que habrá que controlar la cantidad de partículas finas. Por lo tanto, el coque deberá contar con la resistencia necesaria para no ser aplastado por el peso de la carga que tenga por encima. Aparte de la resistencia, deberá contar con poca cantidad de azufre, fósforo y cenizas. Esto requiere el uso de carbón metalúrgico, que es un grado "Premium" debido a su relativa escasez.

La principal reacción química a la hora de producir el hierro fundido es la siguiente:

$$Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2$$

Esta reacción se puede dividir en varias fases, siendo la primera el precalentamiento del aire soplado a horno reaccionando con el carbono en forma de coque para producir monóxido de carbono y calor:

$$2C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)}$$

El CO caliente es el agente reductor del mineral del hierro y reacciona con el óxido de hierro para producir hierro fundido y dióxido de carbono. Dependiendo de la temperatura en las diferentes partes del horno (más caliente en la parte de abajo), el hierro se reduce en fases. En la parte superior, donde la temperatura normalmente está en el rango de los 300-700 °C, tiene lugar la reducción indirecta de la hematites (Fe_2O_3) a magnetita (Fe_3O_4):

$$3Fe_2O_{3(s)} + CO_{(g)} \rightarrow 2Fe_3O_{4(s)} + CO_{2(g)}$$

Cuando las temperaturas rondan los 850 °C, en la parte baja del horno, la magnetita sufre la reducción indirecta a wustita (FeO):

$$Fe_3O_{4(s)} + CO_{(g)} \rightarrow 3FeO_{(s)} + CO_{2(g)}$$

El dióxido de carbono caliente, que es monóxido de carbono que no ha reaccionado, y el nitrógeno del aire recorren el horno hacia arriba mientras que la carga se mueve hacia abajo, a la zona de reacción. A medida que el material cae, los gases calientan la carga y descomponen la caliza (fundente) en óxido de calcio y dióxido de carbono:

$$CaCO_{3(s)} \rightarrow CaO_{(s)} + CO_{2(g)}$$

El óxido de calcio formado por descomposición reacciona con varias impurezas ácidas en el hierro (sobre todo sílice) para formar una escoria fayalítica, que es básicamente silicato de calcio ($CaSiO_3$):

$$SiO_2 + CaO \rightarrow CaSiO_3$$

En la zona central de la cuba, y a medida que se desciende (comienzo de la zona de reacción o elaboración), se pueden alcanzar temperaturas de hasta 1.200 °C, lo que permite la reducción indirecta de la wustita a hierro en pequeños porcentajes:

$$FeO_{(s)} + CO_{(g)} \rightarrow Fe_{(s)} + CO_{2(g)}$$

El dióxido de carbono formado en este proceso es reducido nuevamente a monóxido de carbono por el coque:

$$C_{(s)} + CO_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)}$$

El equilibrio dependiente de la temperatura que controla la atmósfera de gas en el horno es conocido como reacción de Boudouard:

$$2CO \leftrightarrow CO_2 + C$$

El arrabio producido por el horno alto tiene un contenido en carbono relativamente alto, alrededor del 4-5 %, convirtiéndolo en bastante frágil y de uso comercial inmediato. Aunque parte se usa para hacer hierro fundido, la mayor parte del arrabio producido por los hornos altos es sometida a procesos posteriores para reducir el contenido en carbono y producir grados de acero de calidad destinados a materiales de construcción, automóviles, barcos y maquinaria.

3.6 Funcionamiento ideal de un horno alto. Diagrama de Rist.

Un alto horno puede considerarse como un esquema dividido en varias partes, en cada una de las cuales tienen lugar diferentes tipos de reacciones e intercambios (*Ilustración 15*). Estas partes se podrían clasificar como se describe a continuación:

Con respecto al carbono, puede ser considerado como material químicamente inerte hasta que no alcance los 1.000 °C de temperatura. Alrededor de estas temperaturas, el carbono es protagonista de indispensables reacciones endotérmicas conocidas como reducción directa. La combustión y las reacciones directas gasifican el carbono en CO.

En cuanto al calor, el que se desprende por la combustión es cedido por el gas a la carga líquida o sólida en un intercambiador en contracorriente que va desde el nivel de toberas hasta el nivel de carga. Las reacciones endotérmicas de reducción directa, dadas en las zonas que rondan los 1.000 °C, modifican la razón entre la capacidad calorífica de los sólidos con respecto a la capacidad calorífica de los gases. Estas reacciones provocan que, a partir del tope y del nivel de toberas, las temperaturas de los gases y de los materiales sólidos o líquidos converjan hacia los 1.000 °C.

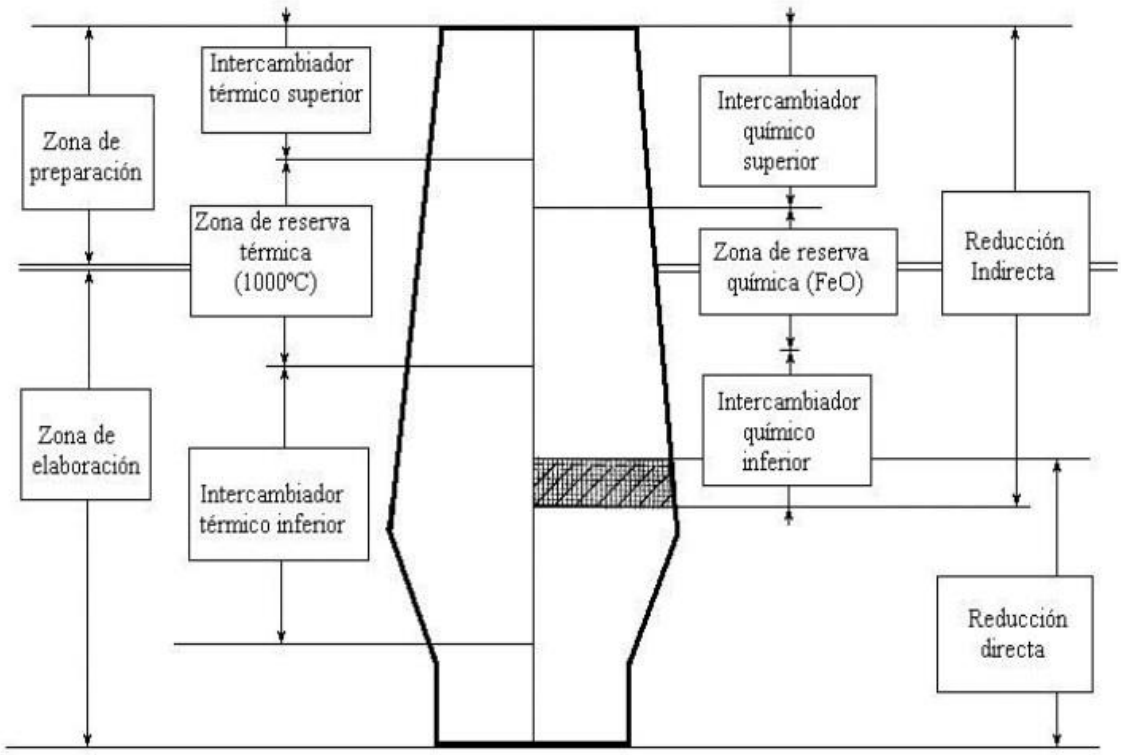


Ilustración 15: Divisiones térmicas y químicas de un horno alto ideal.

En la zona de elaboración, cuando la temperatura es menor de 1.000 °C, los requerimientos térmicos se encuentran asegurados por la combustión del carbono y por el viento caliente. En esta zona, cuanto más caliente es el viento, menos abundante es el gas generado.

En la zona de preparación, con temperaturas mayores de 1.000 °C, las necesidades térmicas están aseguradas por el gas caliente que entra a 1.000 °C. A menos cantidad de gas suministrado o más materia a calentar, más baja es la temperatura del gas de tope.

En la zona que comprende el intercambiador térmico superior y la zona de reserva térmica, la cuba, el carbono es inerte y la reducción de los óxidos de hierro solo ocurre por vía indirecta, esto es, por conversión del CO en CO_2.

La producción de gas reductor en etalajes y crisol viene dada por varias reacciones.

Reducción directa de los óxidos de hierro:

$$FeO + C = Fe + CO$$

Reducción de óxidos que dan los elementos disueltos en el arrabio:

$$MnO + C = Mn + CO$$

$$\frac{1}{2}SiO_2 + C = \frac{1}{2}Si + CO$$

$$\frac{1}{5}P_2O_5 + C = \frac{2}{5}P + CO$$

$$\frac{1}{5}V_2O_5 + C = \frac{2}{5}V + CO$$

Entrada en solución del azufre en la escoria:

$$S + C + O = S + CO$$

Combustión frente a las toberas:

$$\frac{1}{2}O_2 + C = CO$$

El conjunto formado por estas reacciones (*Ilustración 16*) consume 1 átomo de oxígeno y produce 1 mol de CO por átomo de carbono gasificado.

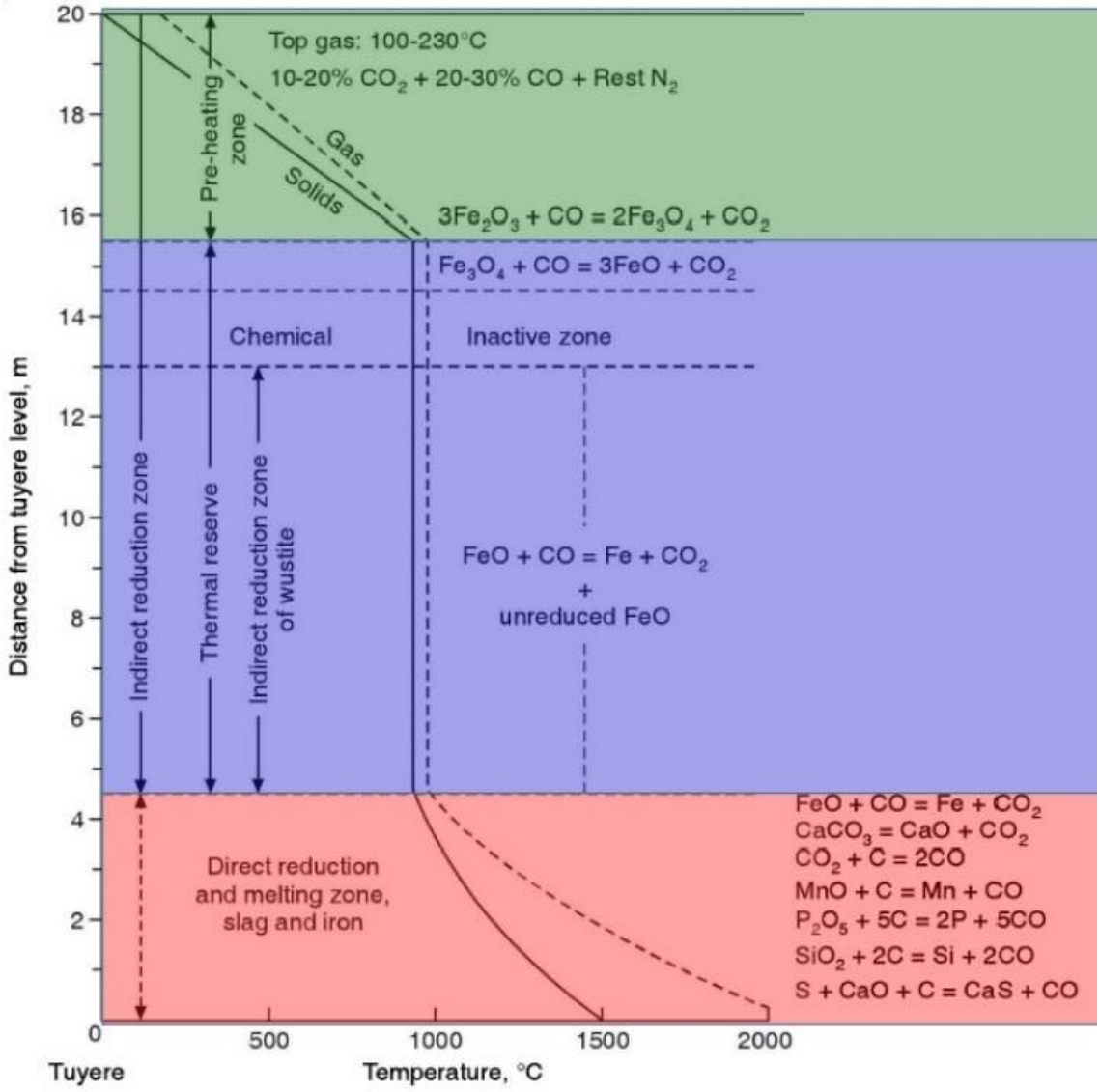


Ilustración 16: Diagrama de las reacciones químicas en el interior del horno alto.

Esto se puede representar gráficamente (*Ilustración 17*) por el segmento BE de proyecciones 1 sobre OX y μ sobre OY, donde

$$\mu = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{n_C}{n_{Fe}}$$

Es la pendiente del diagrama.

El resto de reacciones están representadas por los siguientes segmentos:

BC para la reducción directa de los óxidos de hierro.

CD para la reducción de los óxidos que dan los elementos disueltos en el arrabio y para la entrada en solución del azufre en la escoria.

DE para la combustión por el viento caliente frente a las toberas.

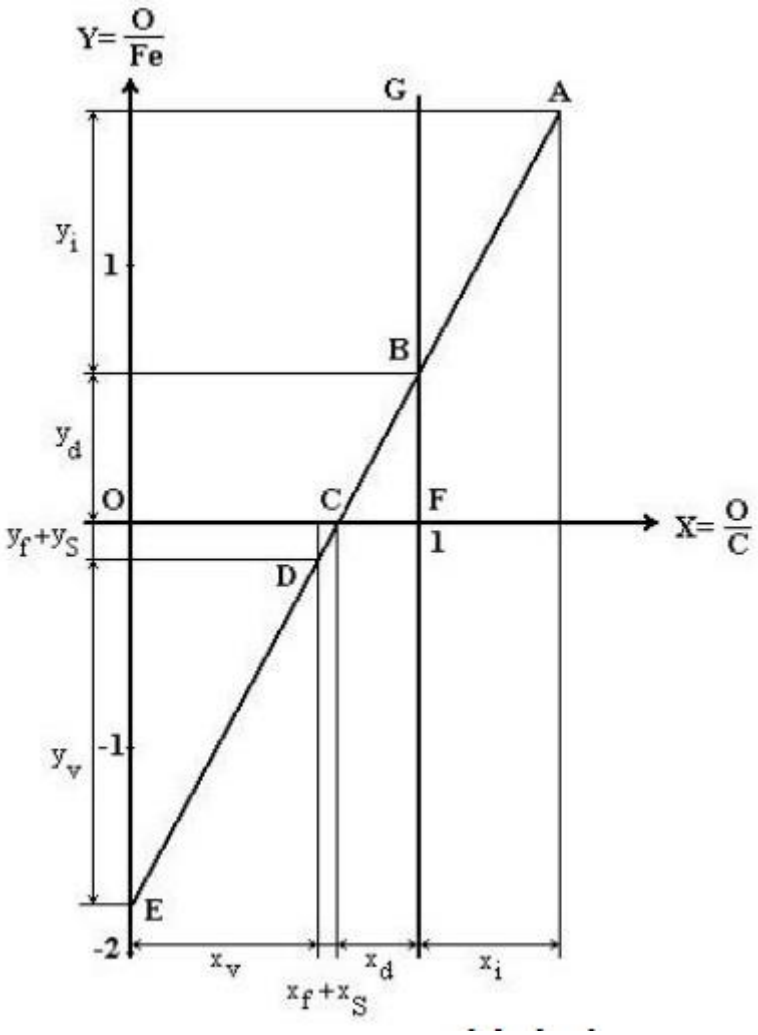


Ilustración 17: Recta operativa del horno alto.

Podemos obtener:

$$y_d + y_f + y_s + y_v = \mu$$

$$x_d + x_f + x_s + x_v = 1$$

La primera ecuación indica el consumo de carbono gasificado.

También es posible calcular la composición del gas de tope:

$$\%CO_2 = \frac{100x_i}{(1 + 1{,}88x_v)}$$

$$\%CO = \frac{100(1 - x_i)}{(1 + 1{,}88x_v)}$$

$$\%N_2 = \frac{100(1{,}88x_v)}{(1 + 1{,}88x_v)}$$

3.7 ULCOS

Aunque la eficiencia de los hornos altos se encuentra en constante evolución, el proceso químico del interior del horno se ha mantenido invariable. En este sentido, es remarcable la afirmación del "American Iron and Steel Institute" (Instituto Americano de Hierro y Acero): "Los hornos altos se mantendrán en los próximos años debido a que los hornos más grandes y eficientes pueden producir metal con costes competitivos con respecto a otras tecnologías." Uno de los mayores inconvenientes de los altos hornos es la inevitable emisión de dióxido de carbono al reducir el hierro en óxidos de hierro por el carbono y, al menos por ahora, no existe un sustituto económico (la fabricación del acero es una de las mayores fuentes de emisiones de CO_2 en el mundo).

Existe una investigación llevada a cabo por el Programa Europeo llamado ULCOS (Ultra Low CO_2 Steelmaking) dedicada a experimentar diversos procesos alternativos que reduzcan las emisiones de este gas de manera drástica (en torno al 50 %). Algunos de estos procesos están relacionados con la captura y almacenaje de CO_2, mientras que otros optan por descarbonizar la producción de hierro y acero, inclinándose por la biomasa, electricidad o el hidrógeno. A corto plazo, existe una tecnología que incorpora la captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CAC) al propio horno alto (Top-Gas Recycling Blast Furnace) que se encuentra en proceso de ser comercializa a finales de esta década, coincidiendo con los plazos fijados por la Unión Europea para reducir las emisiones significativamente.

Ultra Low CO_2 Steelmaking es el nombre de un consorcio formado por 48 compañías europeas y organizaciones de 15 países europeos que iniciaron una iniciativa de investigación y desarrollo que permita una reducción drástica de las emisiones de CO_2 en la fabricación de acero.

El consorcio está formado por grandes compañías europeas del acero, colaboradores del sector de la energía y la ingeniería, institutos de investigación y universidades, y está financiado por la Comisión Europea. El objetivo del programa es reducir las emisiones actuales de CO_2 al menos un 50 %.

ULCOS es actualmente el mayor esfuerzo dentro de la industria del acero buscando soluciones para la amenaza del cambio climático. Las habilidades del consorcio van

desde la fabricación del acero a la producción de biomasa y el almacenamiento geológico de dióxido de carbono e incluye procesos científicos, así como ingeniería, economía de energía y estudios de previsión en relación con el cambio climático.

El presupuesto es de 75 millones de euros durante un periodo de 6 años, lo que significa que cientos de personas están involucradas cada año en el proyecto. Los colaboradores del consorcio se han encargado del 60 % del coste total. La Comisión Europea contribuye financieramente al otro 40 % a través del RFCS (Research Fund Coal Steel), programa dedicado a promover la investigación industrial y el desarrollo tecnológico en Europa.

El proyecto está dirigido por los llamados miembros principales que además del trabajo que realizan también contribuyen al presupuesto. Todo ello está coordinado por ArcelorMittal.

Actualmente el proyecto se encuentra en la llamada fase ULCOS II, donde se está experimentando con las tecnologías investigadas en la fase ULCOS I, finalizada en 2010. Esta nueva fase debería llevarse a cabo durante esta década, para que dentro de 15 o 20 años se pueda aplicar a la industria.

ULCOS tiene seleccionados 4 procesos que podrían llevar a la reducción de las emisiones en un 50 %. A continuación, las describiremos brevemente:

3.7.1 Top Gas Recycling

Este concepto se basa en la separación de los gases salientes de manera que los componentes útiles se puedan reutilizar en el horno y se usen como agentes reductores. Esto reduciría la cantidad de coque necesario. Además, el hecho de inyectar oxígeno en el horno en lugar de aire precalentado eliminaría nitrógeno indeseado del gas, facilitando la captura y almacenamiento de CO_2.

Para llevar a cabo este método se construyó una planta de separación de gases en Lulea, Suecia. Ya en 2007 se operó con un horno alto experimental y se saldó con éxito la operación usando oxígeno puro y reinyectando CO.

3.7.2 HIsarna

Tata Steel, como parte del proyecto ULCOS, construyó en 2010 una planta piloto en los Países Bajos, HIsarna. Esta tecnología combina el precalentamiento del carbón y una pirolisis parcial en un reactor, un ciclón para la fusión del mineral y un recipiente de

fundición para la reducción final del mineral y la producción de hierro. Requiere un uso significativamente menor de carbón, reduciendo por consiguiente las emisiones. Concretamente, esta tecnología reduciría un 20 % las emisiones de CO_2 y, en combinación con las técnicas de captura y almacenamiento, la reducción podría alcanzar el 70 %. Además, se trata de un proceso flexible que permite la sustitución parcial del carbón por biomasa, gas natural o incluso hidrógeno.

3.7.3 ULCORED

Consiste en obtener hierro de reducción directa a partir de la oxidación-reducción directa del mineral de hierro, utilizando un gas reductor, proceso de transformación química que elimina el oxígeno y el carbono sin alcanzar el punto de fusión del hierro. Para este proceso se necesita energía eléctrica, por lo que se lleva a cabo en un horno de arco eléctrico.

Realmente, este proceso es más caro que reducir el mineral en un horno alto convencional y además demanda una mejor calidad del mineral de hierro. También hay que tener en cuenta la ineficiencia del proceso debido a la cantidad de electricidad que requiere. Sin embargo, el gran potencial de esta tecnología se centra en el hecho de poder eliminar la necesidad de hornos de coque.

3.7.4 Alkaline Electrolysis

La electrólisis del mineral de hierro es el proceso menos desarrollado de los estudiados en ULCOS. Esta tecnología permitiría la transformación del mineral en metal y oxígeno gas usando únicamente energía eléctrica.

Fabricar hierro por electrólisis supondría el fin de los hornos de coque y de los reactores usados para la reducción del mineral de hierro, como los hornos altos. Se acabaría de la misma forma con la producción de dióxido de carbono en la fabricación de hierro.

Aunque la electrólisis no es un método usado actualmente en la elaboración del hierro, sí es una técnica usada en la industria del aluminio, zinc o níquel.

3.8 Elementos presentes en el arrabio

Aparte de los componentes principales, el hierro y el carbono, existen otros elementos presentes en el arrabio. Esto puede verse a que formaban parte de las materias primas utilizadas o bien porque fueron añadidos con el fin de conseguir un acero con unas propiedades específicas.

Una manera de clasificar estos elementos es teniendo en cuenta su afinidad con el oxígeno, pues es esto lo que determina su paso a la fundición o a la escoria. De esta manera, si dicha afinidad es mayor que la del hierro significa que podrá reducir a éste, mezclándose con el oxígeno del mineral de hierro, y pasando como un compuesto a la escoria. En el caso contrario, si la afinidad del elemento con el oxígeno es menor que la del hierro, es aquel el que podrá reducido y pasará al arrabio.

Vamos a hablar pues de los elementos más importantes presentes en el arrabio:

3.8.1 Fósforo

Se trata de un elemento de sencilla reducción, por lo que en su mayor parte pasa al baño metálico. Es muy importante su eliminación, pues constituye un elemento muy perjudicial para el acero. Para conseguirlo, se debe reducir en la medida de lo posible la entrada de fósforo al horno, tanto por el lado de los materiales como por el de los combustibles.

Cuando los minerales del hierro se funden, el fósforo, en forma de fosfatos de hierro o de calcio, es casi totalmente reducido. Pasa al arrabio combinado con el hierro o el calcio formando fosfuros. Puesto que normalmente existe un exceso de sílice, y al ser el silicato cálcico más estable que el fosfato cálcico, se completa en el horno alto la reducción a fósforo libre. Sin embargo, gran parte de este fósforo pasa al hierro transformado de nuevo en fosfuro férrico.

El contenido en fósforo del arrabio a su salida del horno alto suele estar comprendido entre el 0,07 % y el 0,09 %.

3.8.2 Arsénico

Constituye otro elemento perjudicial. En los casos en los que su contenido en el acero supera el 0,25 %, hace disminuir su soldabilidad, y a partir del 0,8 %, aumenta los fenómenos de envejecimiento del acero.

En las condiciones del horno alto, se reduce totalmente el arsénico, pasando al arrabio formando arseniuro de hierro. Al contrario que el fósforo, no es posible eliminarlo durante la conversión, por lo que el método consiste en evitar introducirlo formando parte de la carga del horno.

3.8.3 Azufre

Otro elemento perjudicial para el acero. En el horno alto su reducción es solamente parcial, pasando parte del azufre al arrabio y parte a la escoria. El objetivo es eliminar la máxima cantidad de azufre de la forma más económica posible.

Cabe destacar que, durante todo el proceso siderúrgico, es precisamente en el horno alto donde más desulfuración se produce, dado que en él se dan los tres requisitos necesarios: alta temperatura, medio básico y ambiente reductor.

El origen del azufre del horno alto viene, principalmente, del coque y de la inyección de diversos combustibles y, en menor medida, acompaña a los minerales que forman la carga. Puede presentarse como sulfuros metálicos o sulfatos cuando forma parte del mineral del coque, o formando complejas cadenas producidas en el proceso de fabricación del coque cuando forma parte de la estructura orgánica del carbón.

Gracias a la oxidación, el azufre se volatiliza formando SO_2 y SO_3, aunque esto solo ocurre en pequeña proporción, debido a que el azufre se combina con el hierro para formar sulfuro de hierro, que pasa al arrabio. Por lo tanto, el gas del horno alto apenas contiene SO_2 o SO_3.

Aparte del sulfuro de hierro también se forman sulfuros de manganeso, calcio y sodio. Mientras que el FeS se disuelve en el arrabio y el MnS también, aunque solo de manera parcial, el CaS y el Na_2S son insolubles en el arrabio.

El método más eficaz para alcanzar la máxima desulfuración del arrabio es operar con gran cantidad de escoria, sin contenido en azufre y lo más básica posible. Se denomina coeficiente de reparto a la relación entre la concentración de azufre en la escoria y el arrabio. Por ejemplo, si el índice de basicidad de la escoria es 1, la cantidad de azufre final en ella será 7 veces mayor que la del arrabio. En el caso de que se añada cal y el índice de la escoria aumente a 1,5, el coeficiente de reparto será de 40, dado que la escoria atrapa más azufre mediante la formación de sulfuro de calcio.

3.8.4 Manganeso

Se trata de un elemento no perjudicial para el acero, de hecho, se busca que pasa al arrabio en su totalidad.

El manganeso ayuda a neutralizar el azufre, formando sulfuros de azufre y manganeso. Además, disminuye las sopladuras durante el proceso de solidificación del acero de colada por absorción de oxígeno.

Si el acero cuenta con un contenido en manganeso de entre el 0,8 y el 1,6 % verá mejorada su templabilidad. En el caso de la fabricación de aceros indeformables, se emplean contenido entre un 1 y un 3 %, y hasta un 12 % para aceros resistentes al desgaste.

Durante el proceso normal del horno alto, alrededor del 70 % del manganeso pasa al baño metálico. Es posible lograr que ese porcentaje llegue al 90 % aumentando la temperatura. También es deseable tratar con una escoria lo más básica posible. El manganeso que no pasa al arrabio se recoge junto con la escoria en forma de silico-aluminatos complejos de hierro, cal y manganeso.

Cabe mencionar que los minerales de hierro que se usan como carga en los hornos altos suelen contener cierta cantidad de manganeso en forma de óxidos de manganeso o carbonato de manganeso. Los minerales de hierro cuyo porcentaje en manganeso ronda el 25-30 % se llaman minerales ferromanganesíferos; si el porcentaje es mayor son considerados menas de manganeso.

Como en el caso del manganeso, otros metales como el cromo o el vanadio también son beneficiosos para el acero, interesando añadirlos como aleantes para mejorar sus prestaciones.

3.8.5 Silicio

El silicio se caracteriza por una alta afinidad con el oxígeno, por lo que bajo las condiciones de operación normales de un horno alto permanece en su mayor parte en forma de óxido (SiO_2) en la escoria.

Las altas temperaturas del horno favorecen la reducción del silicio en forma de SiO_2 en Si metálico, el cual pasa al arrabio como FeSi, con un porcentaje de silicio de entre el 0,5 y el 1 %.

En los casos en los que el porcentaje de silicio en el acero supera el 1 % se considera elementos aleado. Cuando se supera el 0,4 % de silicio, aumenta la templabilidad del acero, pero a la vez resulta un estorbo de cara a su empleo para embutición profunda, ya que aumenta el límite elástico.

En el caso de aceros de alta elasticidad los porcentajes rondan el 1 o 2 %.

3.8.6 Plomo

Una parte del plomo se vaporiza, pudiendo provocar incrustaciones en el refractario de las paredes, y también puede salir junto con los gases de escape, en forma de polvo.

Debido a la alta densidad que caracteriza al plomo, la parte que no se vaporiza no se incorpora al arrabio, sino que se deposita por debajo de la fundición. De hecho, puede verse en ciertos hornos una piquera encargada específicamente del sangrado del plomo, por debajo del nivel de la piquera de arrabio.

El plomo líquido trae consigo un elevado peligro, pues gracias a su alta fluidez y las elevadas temperaturas del crisol, donde se encuentra, se puede introducir por las juntas de las paredes del horno, llegando incluso a levantarlo.

Asimismo, es un elemento extremadamente tóxico, por lo que debe ser manejado con sumo cuidado. De todas formas, la capacidad de mecanización del acero mejora con contenidos de plomo de hasta el 0,2 %.

3.8.7 Zinc

El peligro del zinc es similar al del plomo, pues el vapor de este elemento se puede condensar en la parte más fría del horno (la superior), reoxidándose. Parte del polvo de zinc sale por el tragante, arrastrado por los gases, pero el resto cae de nuevo al horno, pudiendo provocar incrustaciones corrosivas.

El método más eficaz para eliminar el zinc es utilizar las temperaturas más altas posibles en el horno, haciendo que salgan junto con los vapores.

3.8.8 Sodio y potasio

Los óxidos de estos elementos (K_2O y Na_2O) pasan en su mayor parte a la escoria, pero una parte se recicla dentro del horno, provocando volatilizaciones y reducciones perjudiciales en el proceso normal del horno alto.

Estos álcalis pueden producir pegotes en las zonas más frías al depositarse en las paredes y reaccionar con el refractario silico-aluminoso. También aumentan el contenido en silicio del arrabio y degradan el coque.

Cuando salen por el canal de colada forman humos blancos dañinos para las vías respiratorias.

El límite admisible de la carga en álcalis ronda los 4 o 5 kg/t. Su presencia perjudicial se demuestra entre dos coladas seguidas, pues rebajan la temperatura del arrabio entre 100 y 200 °C al disminuir su permeabilidad, obligando a cambiar el caudal de aire soplado, lo que provoca esa bajada de temperatura.

El método para prevenir estos efectos consiste en trabajar con escorias más ácidas. De esta forma, estos óxidos pasan a ellas.

3.9 La escoria en el horno alto

Como se ha mencionado anteriormente, la escoria flota sobre el arrabio cuando salen ambos del interior del horno alto, durante el sangrado. Esto es así debido a la menor densidad de los óxidos que forman la escoria. Estos óxidos son útiles para eliminar materiales no férreos procedentes de la carga del horno, que no queremos que formen parte de la composición final del arrabio.

Por tanto, la escoria está formada por materiales sin valor. Concretamente, se forma por la mezcla del fundente (usualmente caliza y una pequeña cantidad de dolomía) con la ganga del mineral y las cenizas del coque. De hecho, la formación de la escoria es la principal función del fundente, provocando de esta manera la fusión de la ganga y las impurezas (cenizas) del coque. Si no se usan los fundentes adecuados, algunas de estas impurezas no se fundirían y podrían producir atascos al alcanzar la parte baja del horno en estado sólido.

El hecho de que la escoria flote sobre el arrabio supone una gran ventaja, ya que en esa zona del horno la atmósfera es oxidante y la capa de escoria protege al arrabio de la oxidación. La función de la escoria es, de este modo, doble: actúa como fundente, asegurando el estado líquido en el arrabio, de forma que se pueda separar el hierro de la ganga, y como depurador, evitando que la atmósfera oxidante ataque al arrabio y separando de él ciertos elementos que podrían acabar resultando perjudiciales.

Las características de la escoria, tales como su composición, basicidad, fluidez o temperatura de fusión, son factores decisivos para la correcta marcha operativa del horno alto.

3.9.1 Basicidad de la escoria

Las escorias se pueden clasificar según el llamado índice de basicidad, que no es más que la proporción de productos alcalinos o básicos en su composición. Según ésta, se pueden distinguir tres tipos de índices:

- El índice más simple solo tiene en cuenta la cal y la sílice. Es muy utilizado dado que se adapta a las escorias más habituales. Su fórmula sería la siguiente:

$$\frac{CaO}{SiO_2}$$

- El índice completo también tiene en cuenta el contenido en magnesia y alúmina. Se calcula así:

$$\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$$

- El tercer índice solo tiene interés en los casos donde la escoria es fuertemente magnésica:

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2}$$

Las escorias ácidas (índice de basicidad menor que 1) presentan un amplio intervalo de solidificación, por lo que, incluso cuando la temperatura baja levemente, siguen fluyendo. Son de color oscuro debido a su contenido en FeO. Si el crisol se encuentra inusualmente frío pueden llegar a ser completamente negras.

El índice de basicidad con el que se suele trabajar en los hornos altos se encuentra entre 1,1 y 1,2, esto es, escorias básicas. Al contrario que las ácidas, tienen un intervalo muy pequeño de solidificación, y son muy fluidas a altas temperaturas. Por el contrario, espesan fácilmente y no corren bien. Indican una marcha caliente y presentan un calor blanco al contener poco FeO.

En general, tanto las escorias básicas como las ácidas presentan diversas ventajas y desventajas. Una escoria demasiado ácida será demasiado viscosa y fluirá con dificultad, pudiendo producir atascamientos durante el sangrado por la piquera. Si es demasiado básica, será muy espesa, fluyendo asimismo con dificultad. Es habitual es añadir cal a las menos ácidas hasta conseguir ese intervalo mencionado anteriormente. Hoy en día lo que se busca es mezclar minerales básicos y ácidos, obteniendo la llamada carga autofundente.

3.9.2 Formación de la escoria

Aunque puede variar un poco, el proceso de formación de la escoria suele ocurrir en la zona del vientre del horno alto, donde se mezcla la ganga del mineral, el coque y los fundentes.

El primer paso de este proceso es el de la descomposición de la caliza que habitualmente se utiliza como fundente:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

Surgen a continuación los silicatos de hierro y de manganeso, al mezclarse parte del óxido de hierro con la sílice de la ganga, así como con algo de óxido de manganeso que puede contener el mineral. Esta primera escoria, rica en wustita y muy fluida, se denomina escoria primaria.

$$SiO_2 + FeO \rightarrow FeO \cdot SiO_2$$

$$SiO_2 + MnO \rightarrow MnO \cdot SiO_2$$

La carga va descendiendo por el interior del horno y la temperatura va aumentando. Estos silicatos recién formados se mezclan con la cal de los fundentes, originando silicatos de cal y liberando los óxidos.

$$FeO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow CaO \cdot SiO_2 + FeO$$

$$MnO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow CaO \cdot SiO_2 + MnO$$

El contenido en FeO y MnO de la escoria va disminuyendo a medida que la columna de la carga desciende por el horno. Llegado un punto en el que ya no está presente FeO, se tiene la llamada escoria secundaria o escoria de rampa, caracterizada por su alta basicidad.

La fluidez de la escoria mejora en las zonas de mayor temperatura, cuando el silicato cálcico reacciona con la alúmina de la ganga. Es en esta última fase cuando las cenizas del coque se incorporan a la escoria, puesto que hasta este momento el coque ha permanecido en estado sólido. Ya en el crisol se logra la escoria final, levemente menos básica que la secundaria.

Se debe conseguir que el contenido de FeO de las escorias sea lo más bajo posible con el fin de evitar pérdidas en el proceso. Habitualmente este porcentaje es menor al 1 %.

A continuación, se muestra unos resultados orientativos de una composición usual de una escoria de horno alto (*Tabla 3*):

Tabla 3: Composición típica de una escoria de horno alto.

Compuesto	Porcentaje (%)
CaO	34 - 42
SiO_2	28 - 38
MgO	6 - 12
Al_2O_3	8 - 20
S	< 1
FeO	< 1
MnO	0,2 – 0,6
Producción de escoria/arrabio	**~300 kg/t arrabio**

La cantidad de escoria óptima es un factor muy variable, pues depende de los minerales que componen la carga del horno y del proceso específico que se siga en cada instalación.

3.9.3 Procesamiento de la escoria

La escoria que sale por la piquera del horno alto, a una temperatura que suele rondar los 1.500 °C, se puede enfriar mediante diversas técnicas, obteniendo así materiales con diferentes características.

Se obtiene la llamada escoria cristalizada mediante el enfriamiento lento de la escoria líquida en grandes fosos. Se forman componentes diversos cuando la materia cristaliza, restando solo una parte en estado vítreo. Cuando la escoria se ha enfriado, se usan camiones para transportarla a la planta de trituración y cribado.

Por el contrario, mediante un enfriamiento brusco de la escoria líquida, se obtiene escoria granulada. Esto se consigue haciéndola caer sobre un fuerte chorro de agua fría. Este proceso se llama granulación, porque la escoria se descompone en pequeñas partículas alveolares con aristas cortantes, similar a una arena. Debido a la rapidez del enfriamiento, los átomos no cristalizan.

Otro método consiste en dejar caer la escoria fundida sobre un tambor giratorio, regado con agua, que lanza la escoria al aire, formando una pila al caer al suelo. Así se obtiene la escoria peletizada.

Si se añade una pequeña cantidad de agua a la escoria fundida se obtendrá la escoria expandida. Cuando esta entra en contacto con el agua se origina vapor que produce una espuma plástica que, una vez enfriada y tras ser sometida a un proceso de machaqueo, proporciona un árido ligero.

3.9.4 Aplicaciones

Se muestran en una tabla las posibles aplicaciones que se pueden dar a las escorias de los altos hornos (*Tabla 4*):

Tabla 4: Posibles aplicaciones para la escoria de alto horno.

Enfriada con aire	Peletizada	Granulada
Aglomerado asfáltico	Hormigón de albañilería	Cemento con adiciones
Árido para hormigón/albañilería	Hormigón ligero	Suelo-cemento
Aislamiento/lana mineral	Relleno ligero	Hormigón compactado con rodillo
Materia prima para la fabricación de cemento	Aislamiento	Capa base de carreteras
Agricultura/Mejora del suelo		Agricultura/Mejora del suelo
Relleno		

3.10 Balance de masa en el horno alto

Una vez descritos todos los componentes que forman una instalación de horno alto y todos los materiales que juegan algún papel en su funcionamiento, vamos a describir un ejemplo de balance de masa en un horno alto clasificado como grande (10.000 toneladas del arrabio al día):

3.10.1 Consumo

$$16.000 - 20.000\ toneladas\ de\ mineral\ de\ hierro$$

$$4.000 - 6.000\ toneladas\ de\ coque$$

$$2.000 - 4.000\ toneladas\ de\ fundente$$

$$11.000\ kNm^3 de\ aire\ comprimido$$

3.10.2 Productos

$$4.000 - 5.000\ toneladas\ de\ escoria + polvo\ de\ tragante$$

$$15.000\ kNm^3 de\ gas\ del\ tragante$$

$$10.000\ toneladas\ de\ arrabio\ al\ día$$

3.11 Afino del arrabio

La conversión del arrabio en acero también se conoce con el nombre de afino. Consiste en reducir el contenido en carbono y otros elementos, introduciéndolos dentro del rango determinado por el cliente.

Durante esta conversión se oxida el arrabio reduciendo su contenido en carbono de un 4-4,8 % hasta alcanzar un 0,03-0,6 %, dependiendo de las especificaciones que se requieran.

El método más utilizado actualmente es el llamado proceso LD, que se lleva a cabo en un convertidor de oxígeno básico o convertidor soplado por oxígeno. Fue ideado por Robert Durrer a mediados del siglo XX y se trata del procedimiento de fabricación de acero más importante de la segunda mitad de nuestro siglo y que desplazó rápidamente a los procesos Bessemer, Thomas y Siemens empleados hasta ese momento.

En este proceso LD, se utiliza un chorro de oxígeno puro a gran velocidad inyectado con una lanza vertical introducida por la boca del convertidor para atacar el arrabio. Este convertidor cuenta con un revestimiento de carácter básico y está cerrado por la parte inferior. El oxígeno se mezcla con el carbono del arrabio, formando monóxido y dióxido de carbono, escapándose estos en forma gaseosa. De esta forma, se reduce el porcentaje de carbono disuelto en el hierro y se obtiene acero. Durante el proceso (*Ilustración 18*), otros elementos no deseados también son oxidados, pasando a formar parte de la escoria.

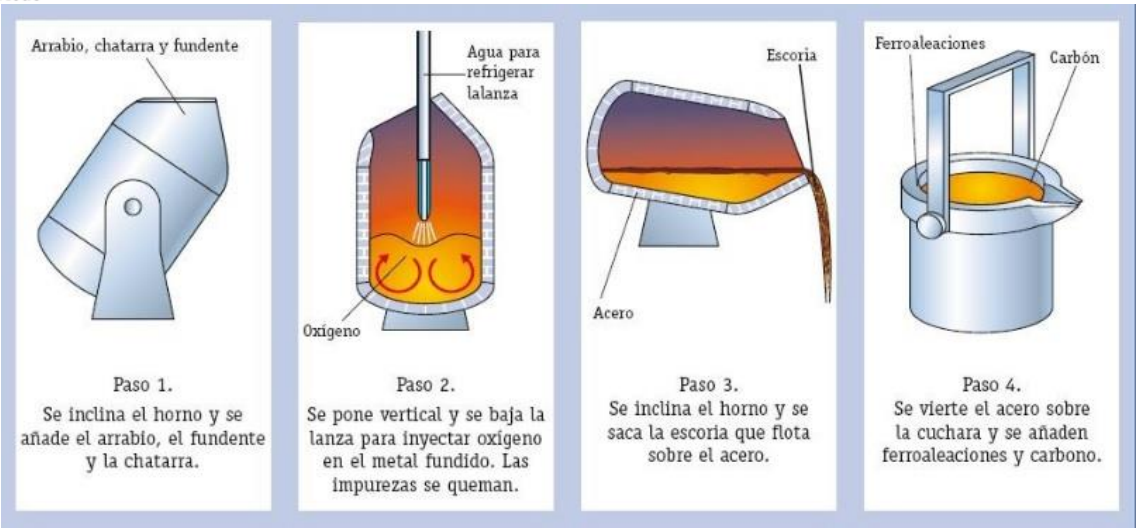


Ilustración 18: Fases del proceso de afino del arrabio en el convertidor LD.

Las razones de la rápida y eficaz implantación del método LD para el afino del arrabio se pueden resumir en los siguientes puntos:

- El acero que se obtiene es de mejor calidad que el que se conseguía mediante los convertidores Bessemer o Thomas.
- En el proceso LD la colada del acero es de corta duración, ronda los 30 minutos, mientras que en el método Siemens podía tardar aproximadamente 5 o 6 horas, y en el horno eléctrico alrededor de 2 horas.
- El convertidor LD se basa en el empleo de arrabio líquido obtenido de los hornos altos y carga además chatarra, lo que permite aprovechar material de las propias fábricas, ya sea defectuoso (despuntes de colada continua, despuntes de laminación, restos de cucharas y tundish) o hierro recuperado de la escoria del convertidor, entre otros.

El proceso LD también se puede denominar BOF, refiriéndose al propio convertidor (Basic Oxigen Furnace). Mediante este método pueden llegar a lograrse productividades superiores a las 600 toneladas por hora y convertidor en funcionamiento.

3.12 Colada en lingotera

Este tipo de colada consiste en colar el acero en estado líquido en la lingotera para que inmediatamente comience a solidificar.

En un primer momento, solidifica el material periférico en contacto con las paredes frías y luego el fenómeno avanza paralelamente a ellas, hacia el interior. De manera gradual,

el líquido se va solidificando hacia la región central y se crea por contracción una cavidad llamada rechupe en la parte superior del lingote. Finalmente, se extrae el lingote de la lingotera.

Generalmente, para evitar que el acero solidifique en la parte superior del lingote y produzca un volumen vacío en el centro, se agrega en la parte superior de la lingotera una pared de material refractario que impide la solidificación del acero. Además, las paredes de la lingotera están inclinadas con el fin de facilitar la extracción del lingote.

Por otro lado, las lingoteras pueden tener diferentes formas dependiendo del tipo de producto final que se desee obtener: lingotes de sección rectangular para planos, de sección cuadrada para no planos o lingotes de sección poligonal para la forja.

3.13 Colada continua

La colada continua es un proceso de solidificación en el que el acero líquido es vertido directamente en un molde que no tiene fondo con la forma de la sección transversal del semiproducto que se desea fabricar.

Se llama continua porque el acero líquido llega sin interrupción al molde, obteniéndose un desbaste tras otro sin que la línea de producción se detenga.

A diferencia de la colada convencional, de este método se consiguen de manera directa los desbastes, sin tener que pasar de nuevo por un horno de fosa y un tren desbastador.

Los semiproductos que se obtienen (*Ilustración 19*) son los desbastes planos rectangulares (slabs), planchones, planchas de menor sección, desbastes de sección cuadrada (blooms) y palanquilla.

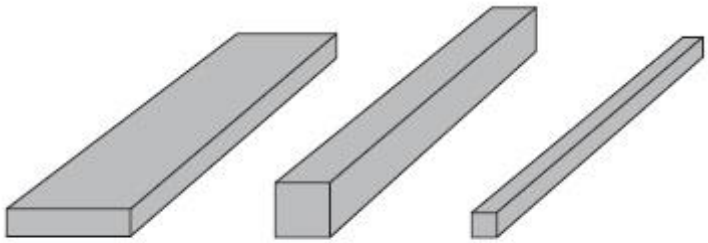


Ilustración 19: De izquierda a derecha: slab, bloom y palanquilla.

3.14 Control operativo del alto horno

Como en cualquier sector de la industria, la siderurgia, y en concreto los procesos de fabricación de acero, se encuentran desde hace décadas en continua evolución. Es por esto que el monitorizar y controlar todos los procesos que se llevan a cabo es indispensable para comprender su funcionamiento y poder mejorar cualquier aspecto del mismo, siempre con el fin último de aumentar la productividad. Así, se han conseguido importantes avances tales como introducir nuevos tipos de reductores y bajar el consumo de éstos, mejorar el diseño del proceso de los altos hornos o controlar más eficazmente su funcionamiento.

El sistema de control moderno de los hornos altos se divide en capas, cada una destinada a diferentes tipos de información y control operativo, como vamos a describir a continuación:

- La primera de las capas, denominada Nivel 0, se encarga de los dispositivos de campo. Controla los instrumentos reales, válvulas, motores, controladores de presión, flujos, temperaturas, posiciones o análisis del proceso.
- La segunda capa se llama Nivel 1, y es el controlador lógico programable o sistema de control distribuido. En este nivel se lleva a cabo la secuenciación, el control lógico, el monitoreo de los instrumentos, la alarma, el diagnóstico de primer nivel y la operación de las diferentes áreas del proceso del horno. Los técnicos controlan este nivel a través de ordenadores y paneles de control (*Ilustración 20*). De esta manera, los operadores pueden acceder a cualquier área del alto horno mediante pantallas gráficas que permiten el monitoreo del proceso en las salas de control remoto.



Ilustración 20: Sala de control en una instalación de hornos altos.

- La tercera capa se conoce como Nivel 2, y es donde se encuentra el conocimiento básico del proceso. Aquí se ubican los modelos destinados a controlar y optimizar el proceso mediante algoritmos basados en reglas y cambios de los parámetros. Dicho de otra forma, estos modelos incluyen parámetros tan esenciales como la distribución de la carga, los cálculos de los materiales de la carga, la predicción de elementos no deseados, el análisis del desgaste del material refractario, la optimización de las estufas o los balances de calor y de masa.
- Por último, está el Nivel 3, el más alto, que forma parte de todo el sistema de información de la instalación. Es la parte del sistema de control encargada del mantenimiento de la documentación, la entrada de órdenes, los requerimientos de calidad, el estado de las órdenes y las funciones de gestión. Además, en los últimos años se ha desarrollado la inteligencia artificial para ser capaces de realizar un diagnóstico del proceso operativo del horno en tiempo real, pudiendo modificar los parámetros necesarios para mantener el proceso en su punto óptimo de operación.

3.15 Ventajas del horno alto

Las razones de que los altos hornos sean la unidad dominante en la industria de la producción de arrabio podrían resumirse así:

- Están en continua evolución y los altos hornos modernos se han convertido en reactores altamente eficaces y de bajo consumo de energía.
- Utilizan el propio gas que generan para calentar el viento que a la postre se inyecta en su interior para realizar la combustión, con lo que se aprovecha una energía que, de otra manera, se perdería.
- Inyectando combustibles auxiliares se consigue una ventaja técnica pero también económica, pues se está sustituyendo parte del coque por otros productos más baratos.

3.16 Desventajas del horno alto

Los altos hornos presentan los siguientes inconvenientes:

- Los altos hornos requieren coque y las plantas de coque son caras y tienen muchos problemas ambientales relacionados con su operación.
- Existen rutas más recientes de producción de acero en hornos de arco eléctrico que utilizan chatarra o la producción de hierro por reducción directa.
- Emisión de gases de efecto invernadero durante el tratamiento y manejo de la escoria o del coque, así como en los gases de escape del horno.

4. SIMULACIÓN DE UN HORNO ALTO

Como hemos comentado al principio, el objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster es el de realizar la simulación del proceso operativo de un horno alto. Para ello, usaremos el programa de simulación que pone a nuestra disposición, de manera gratuita, la página web www.steeluniversity.org (*Ilustración 21*).



Ilustración 21: Página web del programa de simulación.

Se trata de una iniciativa online en la que existen diferentes programas de simulación relacionados con los procesos de fabricación del metal. Cabe destacar que la calidad de estos programas se encuentra contrastada de manera clara, pues los desarrolladores del sitio web colaboran con la World Steel Association.

4.1 Introducción

La simulación interactiva que vamos a utilizar ha sido diseñada como una herramienta educacional y de entrenamiento tanto para estudiantes de la metalurgia como para trabajadores de la industria del acero.

El proceso del horno alto es la ruta dominante de fabricación de hierro para obtener las materias primas para la industria de fabricación de acero. El alto horno usa mineral de hierro como materia prima, así como coque y carbón pulverizado como agentes reductores, y caliza como agentes fundentes.

El principal objetivo del proceso del alto horno es producir metal fundido con una calidad determinada para el proceso LD. En general, las características de la fabricación del acero requieren un metal fundido con un 0,3-0,7 % de silicio, 0,2-0,4 % de

manganeso y 0,06-0,13 % de fósforo, así como una temperatura lo más alta posible (1.480-1.520 °C durante la colada). Un horno alto moderno puede rondar los 14-15 metros de diámetro y los 35 metros de altura, con un volumen interno de alrededor de 4.500 m^3. Un horno alto con estas características puede llegar a producir 10.000 toneladas de metal fundido al día.

El mineral de hierro, antes de cargarlo al horno, es sometido a un proceso de sinterizado o pelletizado, con el fin de suministrar la suficiente permeabilidad a la carga del horno. El coque metalúrgico se prepara en una planta de coquización. Tras esto, el sínter, los pélets y el coque se cargan por la parte superior del horno formando una estructura de capas. El viento caliente se inyecta al horno a través de las toberas, y la combustión del coque y del carbón pulverizado produce calor y CO como gas reductor. El gas reductor, mezcla de CO y N_2, asciende por el horno intercambiando calor y reaccionando con las materias primas que descienden desde la parte superior del horno. En un momento dado, el gas se deja escapar por arriba y se recupera como combustible principal para calentar las estufas que sirven para precalentar el aire que luego se inyectará en el horno.

Durante este proceso, es indispensable controlar el espesor de las capas que forman la carga que se ha introducido al horno y su distribución radial, con el fin de que el aire inyectado pueda pasar a través. Mientras la carga desciende por el horno, los materiales de hierro son sometidos a reducción indirecta por el monóxido de carbono en la zona de baja temperatura (la parte superior del horno). En la parte baja, el dióxido de carbono, producido por la reducción del mineral de hierro remanente por el monóxido de carbono, es reducido instantáneamente por el coque y convertido en CO, el cual, de nuevo, reduce el mineral de hierro, por la llamada reacción de Boudouard ($CO_2 + C = 2CO$).

Toda esta secuencia se puede considerar como la reducción directa del mineral de hierro por el carbono sólido (coque) en la zona de alta temperatura de la parte inferior del horno. El hierro reducido, simultáneamente, se funde, gotea y se recoge como metal fundido. Este metal fundido y la escoria fundida se descargan por intervalos (normalmente 2-5 horas) mediante la apertura del tapón de sangrado. Un horno de alta productividad realiza coladas casi de manera continua, durando cada una de ellas alrededor de 3 horas.

El metal fundido se transporta a continuación a la planta del proceso LD mediante vagones torpedo, donde a menudo es pretratado para eliminar el azufre (desulfuración) y el fósforo (defosforación) antes de cargarlo al convertidor BOF.

4.2 Objetivos de la simulación

Esta simulación tiene como objetivo la expansión del conocimiento teórico que tenemos sobre el proceso operativo del horno alto, trasladándolo a la práctica para entender mejor todos los parámetros de los que depende esta secuencia de fabricación de acero tan importante.

Nuestra tarea consistirá en seleccionar las materias primas (minerales, combustibles y fundentes) que se cargarán en el horno alto, así como seleccionar los parámetros necesarios para que la operación sea exitosa, obteniendo finalmente un arrabio con las características deseadas.

Tendremos que controlar aspectos tan importantes como la temperatura del viento caliente inyectado, la basicidad de la escoria, etc. Asimismo, uno de los objetivos finales más importantes será el de conseguir minimizar el coste de producción del arrabio.

El programa nos da la opción de producir dos tipos diferentes de arrabio, ya sea arrabio para acero o arrabio para fundiciones. Nosotros vamos a centrarnos en el de acero, pues le encontramos más interés. A continuación, vamos a describir brevemente cuáles son las diferencias entre ambos productos.

4.2.1 Arrabio para fundiciones

Está destinado para realizar fundiciones. El contenido en silicio suele ser alto, entre un 1,25 % y hasta un 3,6 %, y el contenido en carbono puede ser mayor del 3,3 %. Debido a este alto contenido en silicio, se necesitan altas temperaturas en el alto horno; por lo tanto, el precio de este tipo de arrabio es, en general, mayor que el del arrabio para aceros.

4.2.2 Arrabio para aceros

Este producto está indicado para los procesos de afino del acero, como puede ser el proceso LD, para obtener diferentes grados de acero. El contenido en silicio es menor que en el arrabio para fundición, estando comprendido en el rango de 0,45-1,25 %, mientras que el contenido en carbono supera el 3,5 %, pudiendo alcanzar el 5 %.

4.3 Primera simulación

Para empezar con la simulación del proceso del alto horno (*Ilustración 22*), seleccionamos el idioma deseado y le damos a "comenzar".

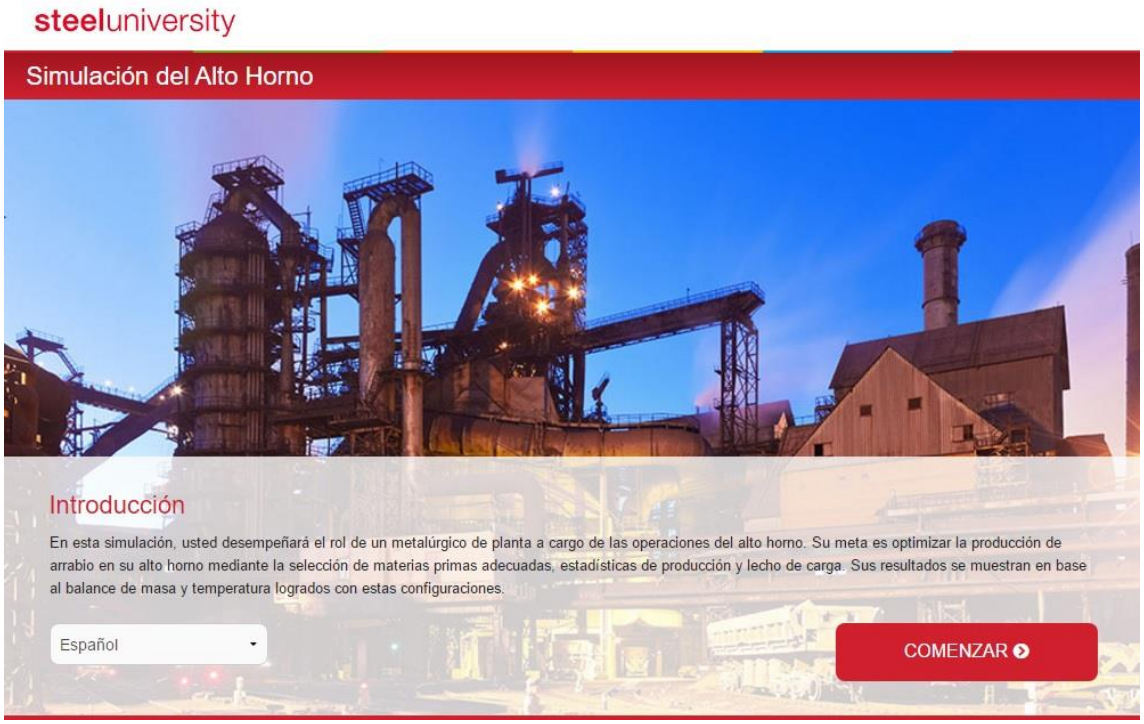


Ilustración 22: Pantalla inicial del simulador.

4.3.1 Parámetros de la simulación

La primera pantalla con la que nos encontramos nos remite toda la información sobre el contenido de las materias primas que formarán la carga del horno (*Ilustración 23*): sinters, pélets y minerales granulares.

Los minerales granulares suelen ser minerales ácidos con contenidos en hierro por encima del 50 % y que se pueden cargar directamente al interior del horno alto. Si se consigue una relación de carga adecuada entre los minerales tratados y los originales, el horno alto podrá funcionar de manera más suave, consiguiendo eficiencias superiores.

Es posible modificar los datos de la composición de los materiales disponibles en esta sección. Para poder llevar a cabo la simulación, debemos asegurarnos de que las composiciones de cada material ronden el 100 %. En concreto, el intervalo aceptado para la composición total va desde el 98 % al 102 %.

También existe la posibilidad de no usar un tipo concreto de material. Esto no afectaría a los cálculos que el programa va a realizar, por lo que podemos experimentar cuanto queramos para ver cómo varían los resultados finales.



Ilustración 23: Materiales que se cargarán al horno.

Los minerales aglomerados son los producidos por los procesos de sinterización y peletización, durante los cuales un fundente básico (caliza o dolomía) se añade a los minerales para conseguir un producto altamente básico.

Como ejemplo vemos el contenido de los pélets (*Ilustración 24*). Observamos que, como cabría esperar, están formados mayoritariamente por Fe_2O_3, con contenidos menores en alúmina, sílice, óxido de calcio y óxido de magnesio.



Ilustración 24: Contenido de la carga del horno.

Tanto el sínter como el resto de materias que formarán la columna de carga del horno tienen contenidos similares.

Luego podemos determinar la composición del recuperado (*Ilustración 25*), siendo la composición predeterminada por el programa mayoritariamente FeO, en casi un 50 % del total. Se pueden elegir cinco tipos. Estos materiales normalmente incluyen escorias metalúrgicas, polvo de hornos altos, etc., así como un aglutinante adecuado que, en ocasiones, incluye escoria granulada de horno alto, cemento o una mezcla de ambos. Es muy importante tener en cuenta que el contenido total de material recuperado en la carga debe ser menor del 1 %.

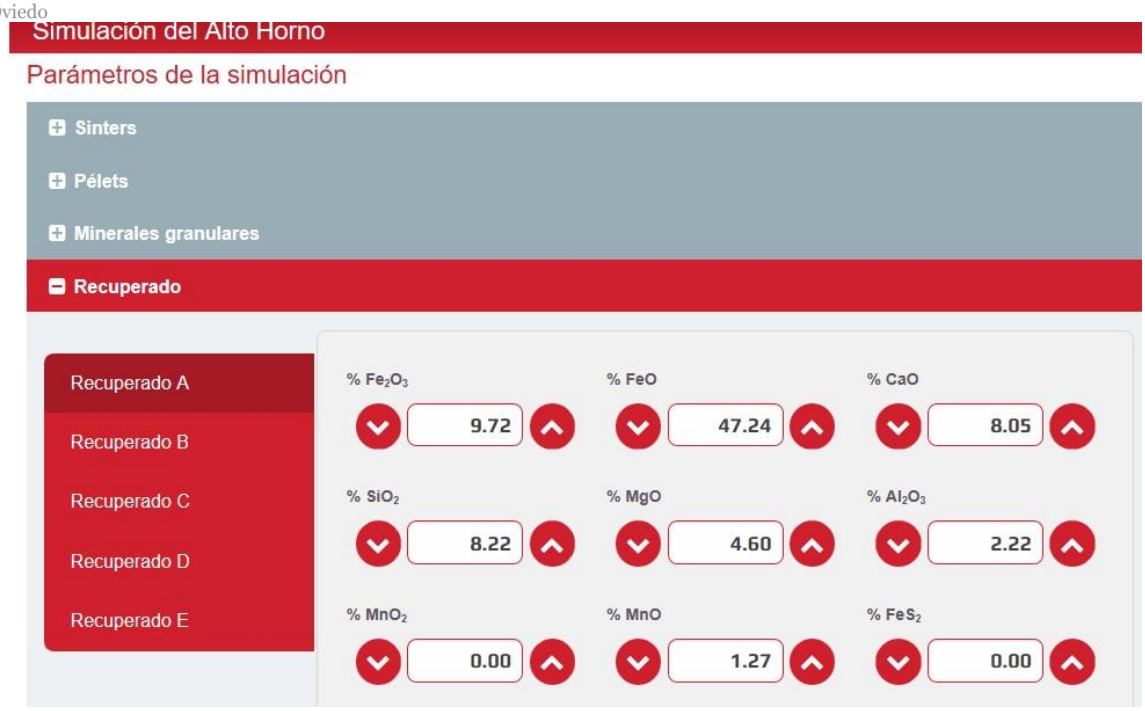


Ilustración 25: Composición del recuperado.

También podemos variar la composición del coque y el carbón que se inyectarán al horno (*Ilustración 26).* En principio, y como es lógico, destacan por su contenido en carbono y cuentan con un 10 % en cenizas.

Para el proceso del horno alto, tanto el coque como el carbón pulverizado son combustibles comúnmente utilizados. El carbón pulverizado se suele inyectar al horno a través de las toberas. Como el precio del coque es bastante alto, se debe tener en cuenta la opción de abaratar costes reduciendo la relación de coque en el horno. Para lograr esto, se puede aumentar la proporción de carbón pulverizado y aumentar la temperatura del viento inyectado, pero no es posible reducir la cantidad de coque por debajo de un nivel mínimo.

En el programa tenemos disponibles tres tipos de coque y tres tipos de carbón para seleccionar.

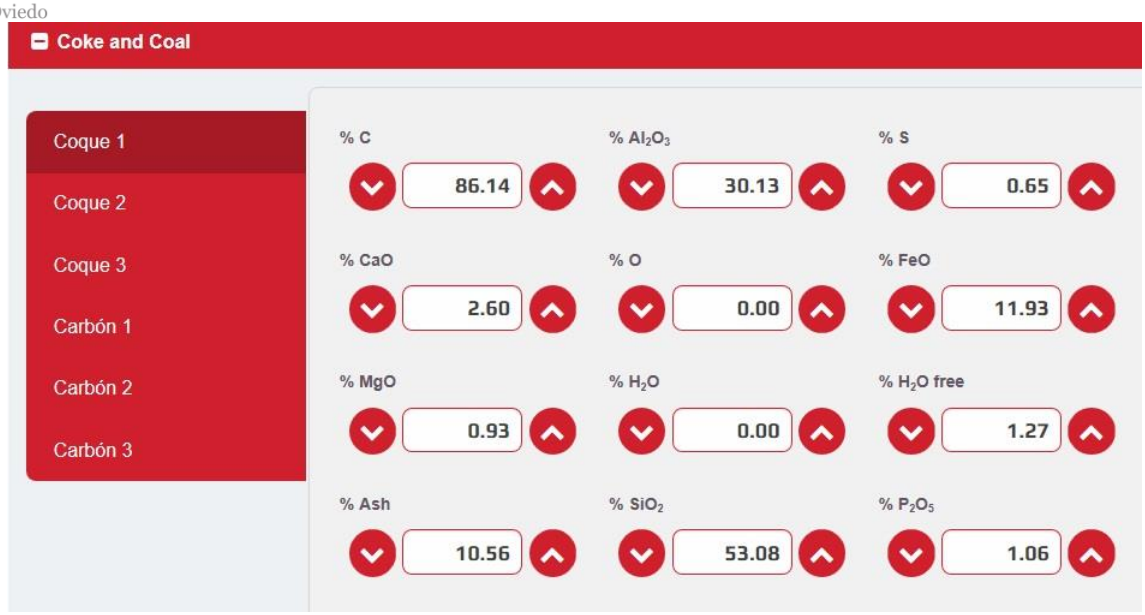


Ilustración 26: Composición predeterminada del coque y el carbón.

Por su parte, vemos que los fundentes disponibles son la caliza, dolomita, sílice y olivino (*Ilustración 27*).

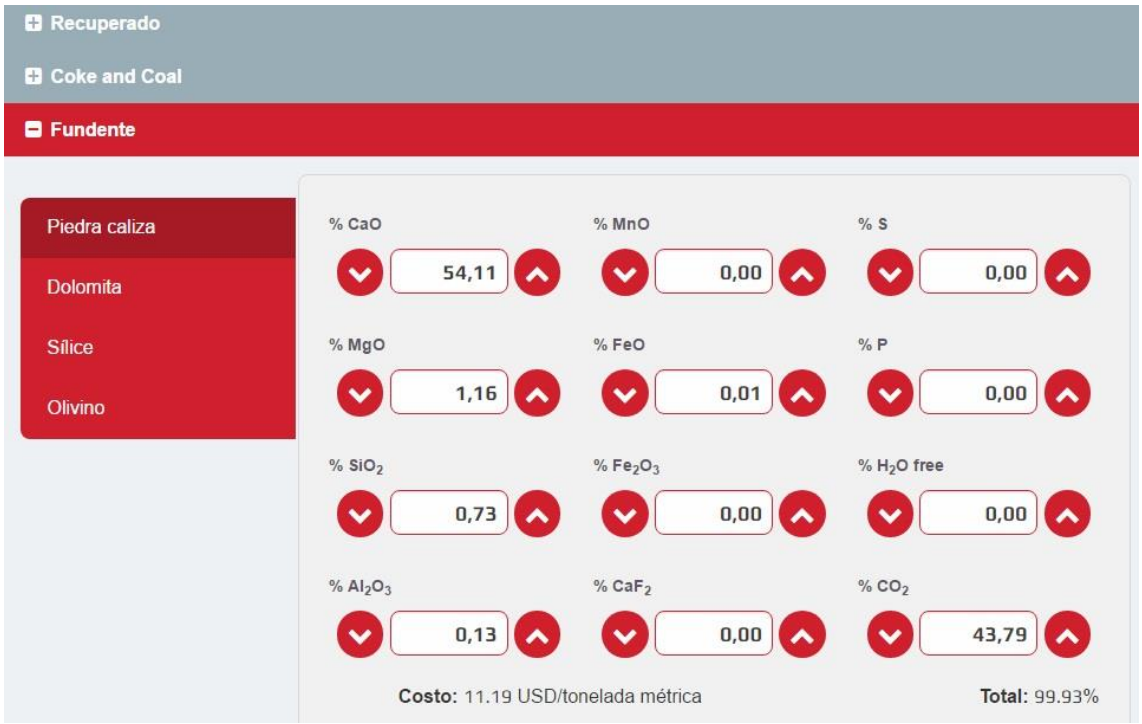


Ilustración 27: Composición del fundente.

4.3.2 Pantalla de trabajo

Una vez que tenemos los materiales que entrarán al horno elegidos (nosotros hemos optado por dejarlos como vienen predeterminados) podemos avanzar a la siguiente

pantalla, en la cual nos encontramos ya la ventana principal de la simulación. Observamos el horno alto en el centro y unos mensajes de aviso en la parte superior derecha (*Ilustración 31*). En concreto, se trata de 5 aspectos que tenemos que optimizar para poder realizar correctamente la simulación.

El programa está diseñado para que no nos permita realizar la colada del horno y, por tanto, no conocer los resultados del proceso, hasta que no consigamos optimizar los aspectos que la simulación dice que debemos mejorar.

Hay que tener en cuenta que cada parámetro de la simulación tiene un intervalo validado (*Tabla 5*). Para los aspectos relacionados con la producción, los límites aplicados son los siguientes:

Tabla 5: Intervalos límite de los parámetros relacionados con la producción.

Parámetro	Intervalo	Comentario
Volumen de trabajo	100 – 10.000 m^3	
Cargas por hora	6 – 10	
Contenido en silicio	0,45 – 1,25 %	Arrabio para acero
	1,25 – 3,6 %	Arrabio para fundiciones
Basicidad objetivo	1,0 – 1,2	Arrabio para acero
	0,95 – 1,1	Arrabio para fundiciones

Otros parámetros a tener en cuenta son las temperaturas (*Ilustración 28*), todas representadas en grados centígrados. Las del metal fundido y la escoria indican la temperatura del interior del horno, mientras que las del gas de tope y el mineral representan la temperatura cuando se está cargando el horno. En cuanto a la temperatura ambiente, se refiere a la del aire que rodea el horno alto.



Ilustración 28: Temperaturas modificables.

La temperatura del aire inyectado se mide en el exterior del cuerpo del horno (*Ilustración 29*). El parámetro llamado "Caída de temperatura" es la diferencia entre el punto de medida y la tubería anterior a las toberas.



Ilustración 29: Propiedades del aire caliente inyectado.

En cuanto a las adiciones de gas (*Ilustración 30*), se entiende por enriquecimiento con oxígeno, en el proceso del alto horno, al aumento de oxígeno en el aire inyectado, en porcentaje.

El porcentaje de carbono que reacciona con el hidrógeno para producir metano se representa como "C-CH_4 ratio".



Ilustración 30: Adiciones de gas (%).

Ahora que conocemos todos los parámetros modificables podemos empezar a trabajar con la simulación.

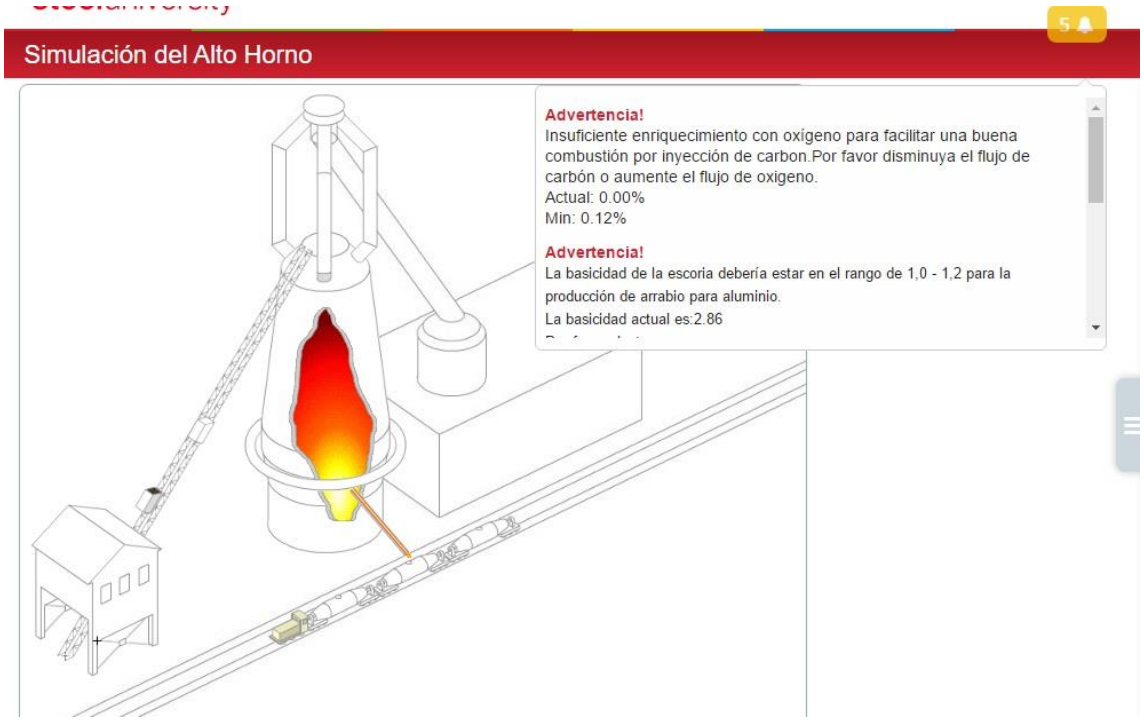


Ilustración 31: Pantalla principal de la simulación.

El primer punto a solucionar nos habla del insuficiente enriquecimiento con oxígeno para facilitar una buena combustión por inyección de carbón. Por tanto, desplegamos la sección de “adiciones de gas” y aumentamos el enriquecimiento con oxígeno, que actualmente está a 0, estableciéndolo en un 3 %.

Observamos que ahora ya son cuatro los mensajes de error (*Ilustración 32*).

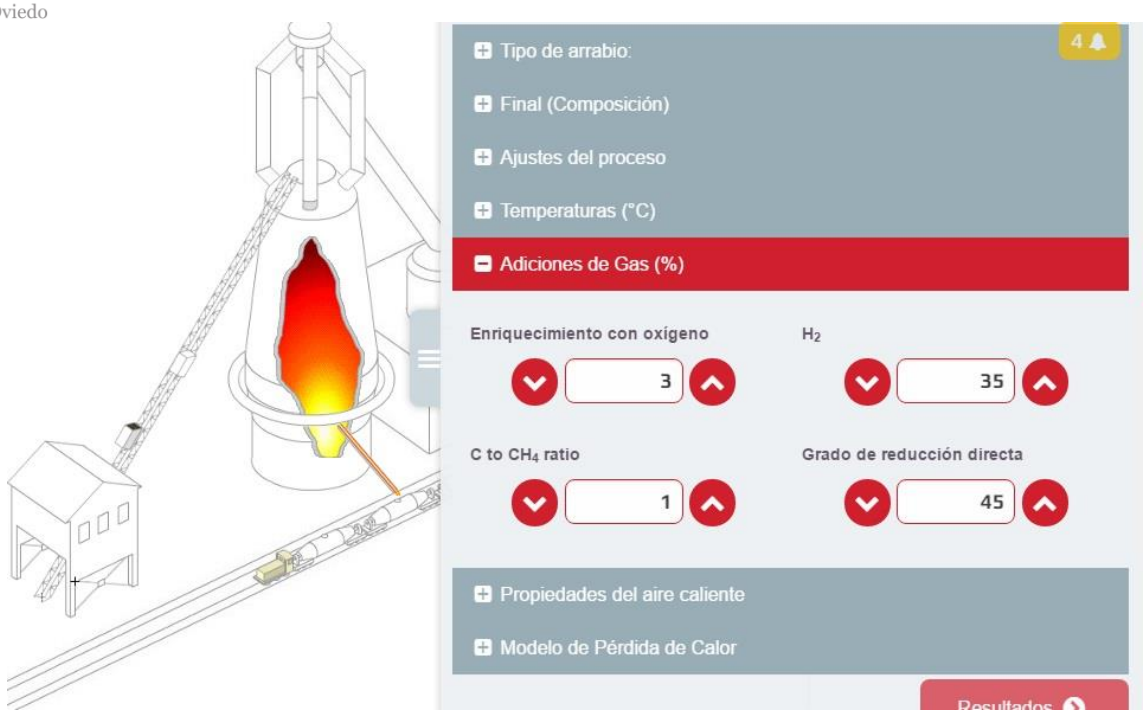


Ilustración 32: Adiciones de gas al horno.

El siguiente mensaje nos dice que la basicidad objetivo de la escoria debería estar comprendida en el rango entre 1 y 1,2, mientras que la actual es de 2,86. Nos da asimismo cuatro posibles soluciones: disminuir la cantidad de mineral básico o la cantidad de fundente básico, o bien aumentar el mineral ácido o el fundente ácido.



Ilustración 33: Composición del fundente utilizado.

En este caso hemos optado por aumentar la cantidad de fundente ácido, la sílice (*Ilustración 33*), que se encontraba a 0, y la establecemos en 3.000. Ya son tres los aspectos que nos restan por optimizar.

De lo siguiente que nos tenemos que encargar es de reducir la cantidad de recuperado que esperamos obtener, puesto que, como ha hemos dicho, esta cantidad debe representar menos del 1 %. Por tanto, desplegamos la sección de mineral y reducimos dicha cantidad (*Ilustración 34*), desde 1.500 a 150.

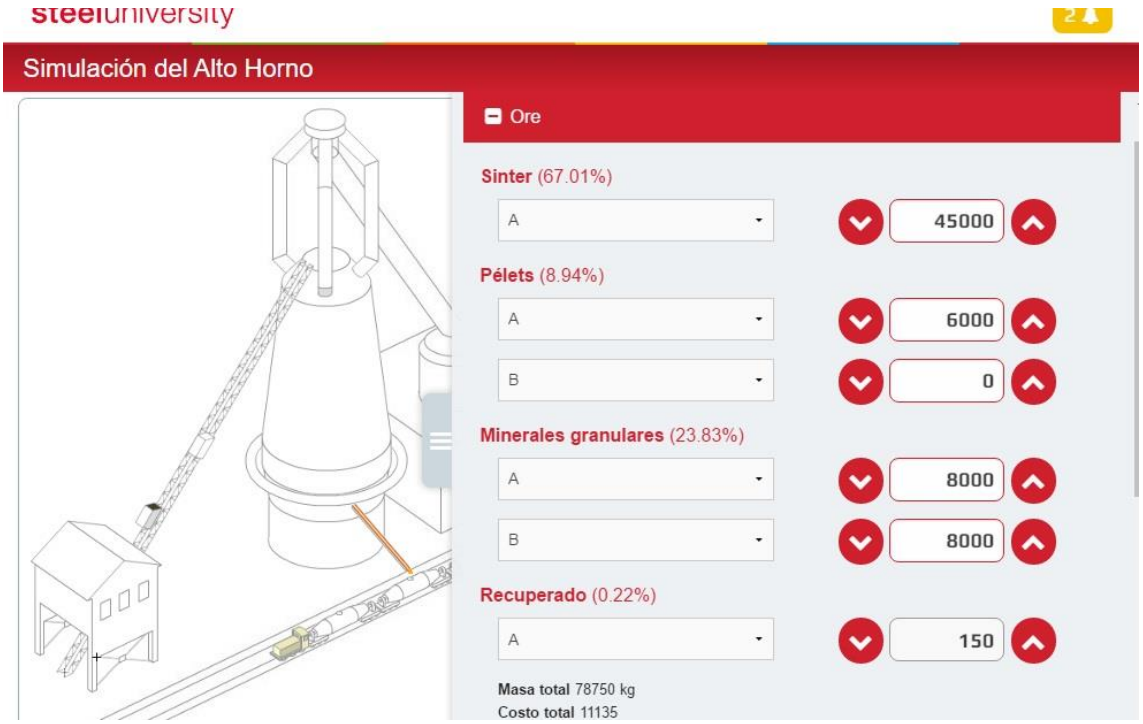


Ilustración 34: Composición de la carga del horno.

Por último, nos centramos en los dos últimos mensajes de error que nos aparecen (*Ilustración 35*).

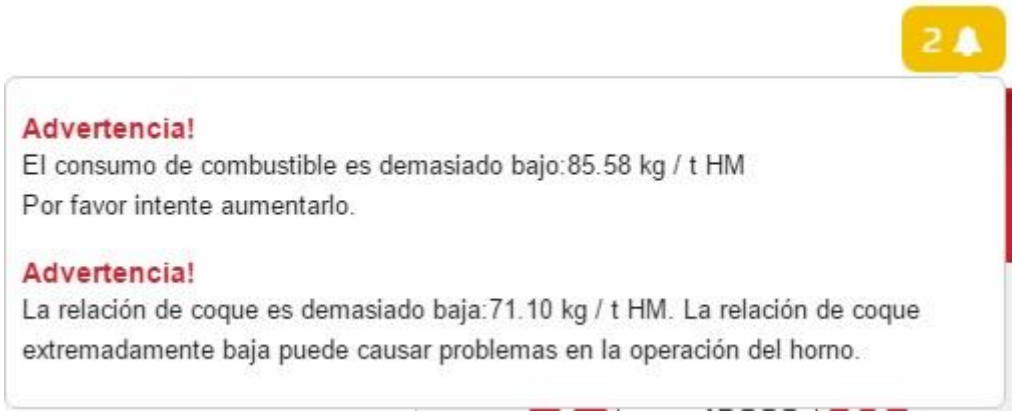


Ilustración 35: Aspectos a optimizar.

Nos hablan de desequilibrios tanto en el consumo de combustible del horno como en la relación de coque de la carga. Para solucionar estos aspectos, debemos ir probando distintas combinaciones en la composición de la carga hasta corregir dichos desequilibrios.

Aumentamos tanto la cantidad de coque como la de carbón (*Ilustración 36*), en la sección de combustible, para que suban sus consumos.



Ilustración 36: Cantidad de combustible que entra al horno.

4.3.3 Pantalla de resultados

Una vez conseguido solucionar todos los parámetros optimizables, ya tenemos la opción de simular la colada del horno y obtener los resultados finales de la simulación. Seleccionamos la opción “Resultados” y pasamos a la siguiente pantalla del programa de simulación.

En ella podemos observar, por ejemplo, las composiciones de salida tanto del arrabio como de la escoria (*Ilustración 37*), así como datos sobre los costes de todos los materiales empleados en el proceso (oxígeno inyectado, materias primas, humedad…).

Aquí vemos una muestra de la calidad del programa, pues podemos observar que la composición final de la escoria que hemos logrado concuerda con aquella que describíamos como típica en la *Tabla 3* del capítulo 3.7 del presente trabajo.

Como otros datos interesantes podemos destacar los del apartado "Rendimiento". En él nos habla de las toneladas de arrabio (HM – Hot Metal) que produce el horno al año (casi dos millones y medio), cada día (casi 7.000 toneladas) y por colada (41 toneladas).



Ilustración 37: Composición del arrabio y de la escoria, costes y rendimientos.

En el apartado de "Costos" observamos que la mayor parte de estos se dedican a la carga sólida del horno (Burden), mientras que el gas saliente se aprovecha para el precalentamiento del viento caliente que se inyecta posteriormente al horno, lo que supone un ahorro, por ello aparece como una cifra negativa.

Como aspecto aclaratorio, decir que los valores que aparecen en el apartado "Basicidad de la Escoria", R2, R3 y R4, se refieren a los tres índices existentes para calcular la misma, ya explicados en el capítulo 3.9.

En otro apartado dentro de la ventana de resultados (*Ilustración 38*), podemos observar los balances de masa y de calor.



Masa en el interior

Mineral mezclado	1622.24kg / t HM	41.53%
Coque	458.99kg / t HM	11.87%
Coque menudo	0.00kg / t HM	0.00%
Polvo de carbón	100.15kg / t HM	2.64%
Carbón granular	0.00kg / t HM	0.00%
Fundente	170.33kg / t HM	4.45%
Inyección de aire	1419.83kg / t HM	37.47%
Agua libre	17.52kg / t HM	0.46%
Total	3789.06kg / t HM	98.43%

Masa en el exterior

Arrabio	1000.00kg / t HM	26.93%
Escoria	322.27kg / t HM	8.68%
Gas de tope	2304.93kg / t HM	62.07%
Polvo	57.89kg / t HM	0.76%
Humedad	28.28kg / t HM	1.56%
Total	3713.37kg / t HM	100.00%

Calor en el interior

Oxidación del carbón	8729507kg / t HM	80.22%
Insuflado de aire caliente	1720852kg / t HM	15.81%
Oxidación del hidrógeno	95590kg / t HM	0.88%
Moldeado de la escoria	109026kg / t HM	1.00%
Calor de los materiales	227302kg / t HM	2.09%
Total	10882278kg / t HM	100.00%

Calor en el exterior

Descomposición del óxido	7351098kg / t HM	67.55%
Descomposición del carbonato	146696kg / t HM	1.35%
Descomposición de la humedad	241348kg / t HM	2.22%
Evaporación del agua libre	42103kg / t HM	0.39%
Descomposición del carbón	1084kg / t HM	0.01%
Hierro fundido	1156592kg / t HM	10.63%
Escoria	432601kg / t HM	3.98%
Gas de tope	588667kg / t HM	5.41%
Pérdida	922088kg / t HM	8.47%
Total	10882278kg / t HM	100.00%

Ilustración 38: Balances de masa y de calor.

La evaluación de los balances de masa y calor es un proceso de cálculo muy importante en el horno alto. Mediante esta evaluación, nos es posible analizar el rendimiento de producción del horno.

El balance de masa se realiza comparando la cantidad de materiales que entran con los que salen (*Tabla 6*). Una vez calculado se usa como base para el balance de calor. Establecer un balance de masa preciso es siempre el primer paso crucial para garantizar la validez del balance de energía.

El cálculo del balance de masa (por tonelada métrica de hierro fundido) comprende los siguientes factores:

Tabla 6: Parámetros del balance de masa.

Masa que entra	Masa que sale
Peso del mineral	1.000 kg de hierro fundido
Peso del coque	Peso de la escoria
Carbón pulverizado	Peso del gas de tope y su composición
Peso del fundente	Peso de la humedad en el gas de tope
Peso del aire inyectado	Peso del polvo producido
Agua	
Masa entrante M_e	**Masa saliente M_s**

El balance de calor, cuyos parámetros se reflejan en la *Tabla 7*, se usa para evaluar la utilización de energía en el horno alto y para reducir los costes, consiguiendo un mayor coeficiente de uso de la energía.

Tabla 7: Parámetros del balance de calor.

Calor que entra	Calor que sale
Oxidación del carbono	Descomposición de los óxidos
Viento caliente	Descomposición de los carbonatos
Oxidación del hidrógeno	Descomposición de la humedad
Calor de la escoria en formación	Evaporación del agua
Calor producido por los materiales	Descomposición del carbón
	Hierro fundido
	Escoria
	Gas de tope
	Pérdida de calor
Calor entrante H_e	**Calor saliente H_s**

Por último, tenemos la posibilidad de conocer los resultados de la carga del horno (*Ilustración 39*), es decir, consumos de coque o carbón, la temperatura del viento inyectado o el coste final que supondría cada tonelada de producto obtenido.

El coeficiente de uso de energía (K_t) indica la relación de calor que sale menos el calor que se lleva el gas de tope y la pérdida de calor del calor entrante total:

$$K_t = \frac{H_s - H_{gas} - H_{pérd}}{H_e} x100\%$$

Cuanto mayor sea este valor, mejor habrá sido el uso de la energía. En general, se encuentra en el rango entre el 75 % y el 85 %, pero en algunos hornos puede llegar a alcanzar el 90 %.

El coeficiente de uso de carbono (K_c) es la relación entre el calor liberado de la oxidación del carbono, donde se produce CO y CO_2, y el calor emitido cuando el carbono se oxida completamente a CO_2. Se expresa así:

$$K_C = \frac{H_{C1\rightarrow CO} + H_{C2\rightarrow CO_2}}{H_{(C1+C2)\rightarrow CO_2}} x100\%$$

Normalmente, K_c varía desde el 48 % al 56 %, pudiendo llegar a ser en algunos casos el 60 %.

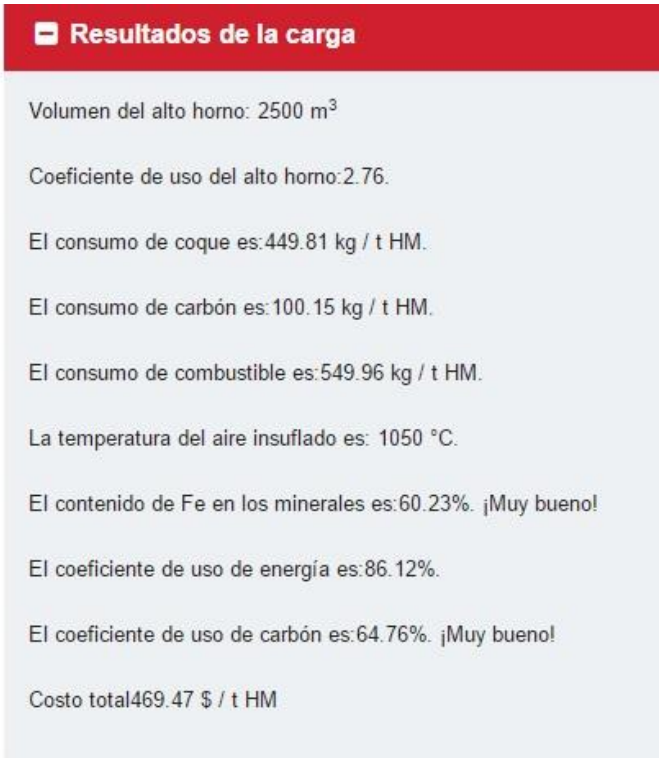


Ilustración 39: Resultados finales de la simulación.

Para comparar y evaluar la eficiencia de producción de diferentes hornos altos y sus costes, en la industria del acero se suelen utilizar parámetros muy útiles, como el coeficiente de uso del volumen, la inyección de carbón pulverizado, la temperatura del viento caliente, así como los coeficientes de uso de energía y carbono (K_t y K_c), descritos anteriormente. En esta simulación, estos parámetros se evalúan y se clasifican en tres niveles, que representamos en la *Tabla 8*: normal, bueno y muy bueno, de acuerdo con los datos publicados por ciertas empresas del acero.

Tabla 8: Índices estándar para la evaluación del rendimiento de producción.

Parámetro	Normal	Bueno	Muy bueno	Primera simulación
Coeficiente de uso	2-2,3	2,3-2,8	2,8-3,2	2,76 (Normal)
Consumo de coque [kg/t HM]	550-450	350-450	250-350	449,81 (Normal)
Consumo de carbón [kg/t HM]	<100	100-160	≥160	100,15 (Bueno)
Consumo de combustible [kg/t HM]	650-570	500-570	440-500	549,96 (Bueno)
Contenido en Fe en el mineral (%)	52-55	55-58	≥58	60,23 (Muy bueno)
Temperatura del aire inyectado (°C)	900-1.050	1.050-1.200	1.200-1.250	1.050 (Bueno)
K_t (%)	75-85	85-90	≥90	86,12 (Bueno)
K_c (%)	48-56	56-60	≥60	64,76 (Muy bueno)

4.4 Segunda simulación

Hemos visto que realizando 7 cargas por hora obtenemos un coeficiente de uso del horno alto de 2,76. Vamos a comprobar que, efectivamente, este parámetro tiene una incidencia en este dato tan importante para el rendimiento de la instalación.

Para ello, dejamos el volumen del horno en su valor por defecto, 2.500 m^3, y aumentamos a 8 las cargas por hora que se efectuarán (*Ilustración 40*).



Ilustración 40: Ajustes del proceso de la segunda simulación.

Dejando el resto de parámetros igual que en la primera simulación, vamos a la pantalla de resultados para analizarlos (*Ilustración 41*).

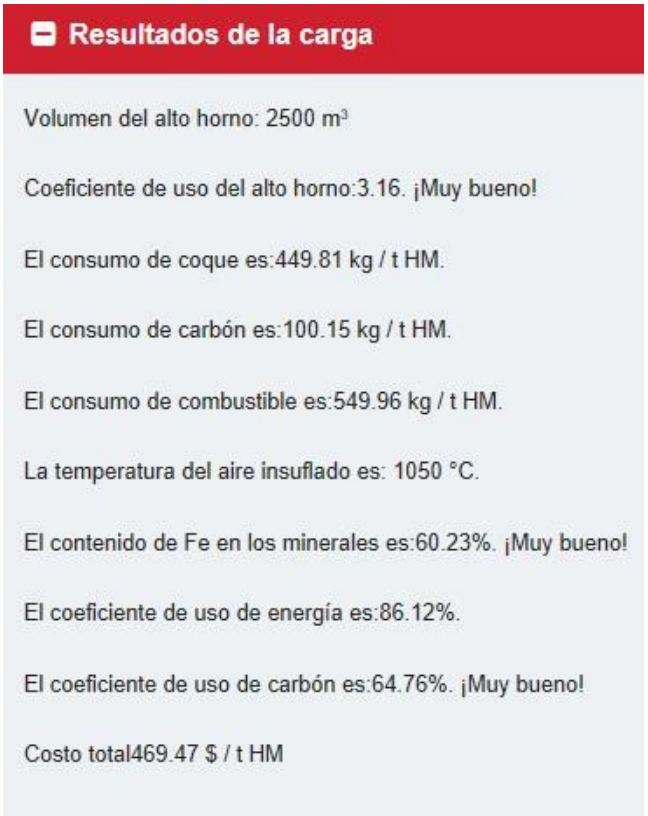


Ilustración 41: Resultados de la carga de la segunda simulación.

Efectivamente, vemos cómo ahora el coeficiente de uso del horno alto es de 3,16, considerándose como muy bueno.

Pero no es esto lo único que cambia. Al aumentar el número de cargas por hora, mejora el rendimiento de producción del horno, y eso es porque la cantidad de toneladas que se producen en la instalación es mayor, como podemos observar en la *Ilustración 42*.



Ilustración 42: Rendimiento de la segunda simulación.

Vemos en la *Tabla 9* cómo han cambiado los rendimientos de la segunda simulación con respecto a la primera:

Tabla 9: Comparación de rendimientos entre las dos simulaciones.

	Primera simulación (7 cargas al día)	Segunda simulación (8 cargas al día)
Toneladas de arrabio en 1 día	6.904,38	7.890,72
Toneladas de arrabio en 1 año	2.394.092,56	2.736.105,78
Coeficiente de uso del horno alto	2,76	3,16

Por lo tanto, podemos llegar a la conclusión de que un aspecto a tener muy en cuenta en el proceso del horno alto es el del número de cargas al horno que se realizarán al día, siendo esencial que este sea lo mayor posible con el fin de obtener un rendimiento de producción elevado y aumentar la eficiencia de la instalación.

4.5 Tercera simulación

Vamos a realizar una última simulación para conseguir que los resultados finales de la simulación estén dentro del intervalo "Muy bueno", mostrado en la *Tabla 8*.

En primer lugar, con el fin de mejorar el coeficiente de uso de energía, aumentamos el enriquecimiento con oxígeno del aire inyectado hasta el 7 % (*Ilustración 43*).

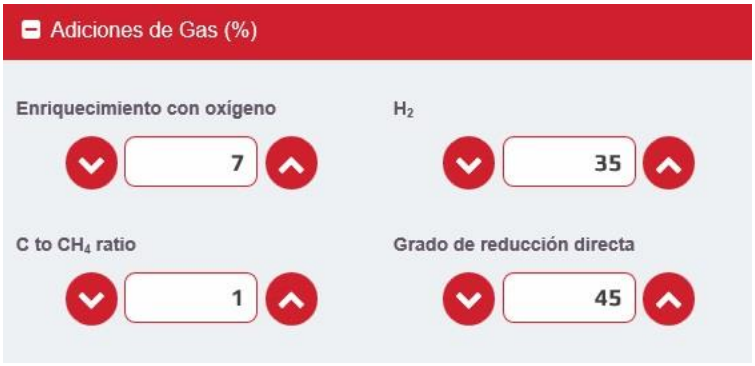


Ilustración 43: Adiciones de gas de la tercera simulación.

Para conseguir el mayor coeficiente de uso del horno posible, ajustamos el proceso para que el volumen de trabajo sea de 2.600 m^3 y se realicen 6 cargas por hora (*Ilustración 44*).

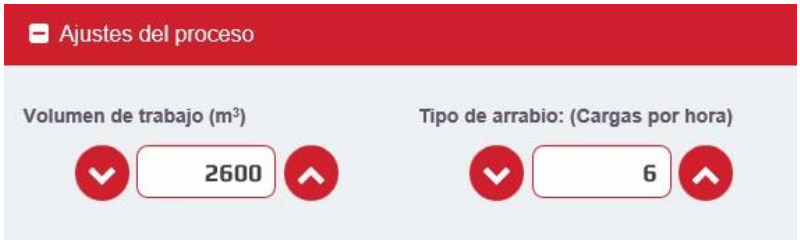


Ilustración 44: Ajustes del proceso de la tercera simulación.

Por último, tenemos que ir probando diferentes combinaciones de fundentes (*Ilustración 45*), de forma que, a la vez que conseguimos la basicidad objetivo de la escoria, no empeoremos el consumo de combustible del horno.



Ilustración 45: Fundente añadido al horno.

Nos cercioramos de que no tenemos ningún mensaje de error en la pantalla de trabajo y seleccionamos la opción "Resultados".

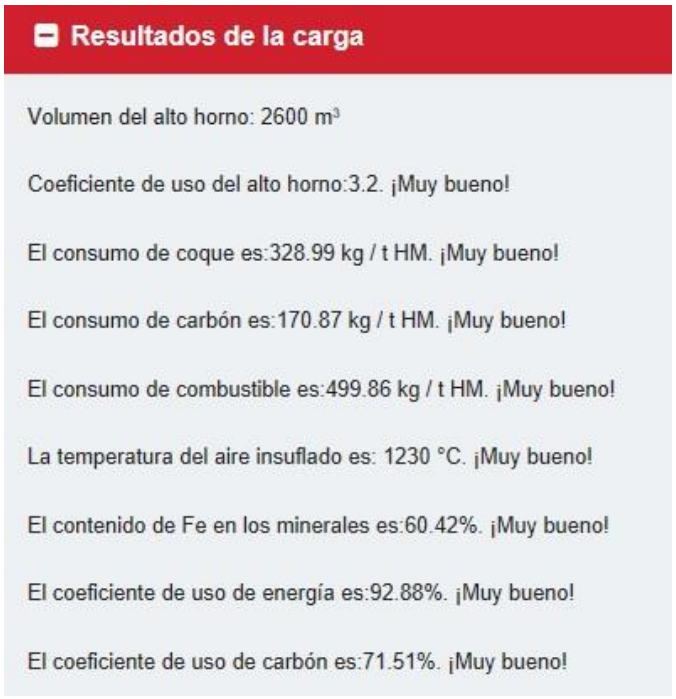


Ilustración 46: Resultados de la carga de la tercera simulación.

Como muestra la *Ilustración 46*, hemos logrado que todos los parámetros que influyen en el rendimiento del horno alto estén en el intervalo "Muy bueno". De esta forma, hemos conseguido optimizar al máximo el programa de simulación, pudiendo dar por concluido nuestro trabajo con él.

CONCLUSIONES

El acero es uno de los materiales más polivalentes que existen. La evolución de la tecnología del ser humano ha estado siempre ligada a la del acero, lo que lo convierte en un factor decisivo para la mejora de nuestra calidad de vida.

Dicho esto, y siendo la ruta del horno alto la más importante a la hora de producir arrabio y, por consiguiente, un método imprescindible para la fabricación del acero, qué mejor manera de demostrar su valor que realizando este estudio en profundidad sobre su funcionamiento, características y evolución. Asimismo, mediante un sencillo pero valioso programa de simulación, se ha llevado a la práctica (virtualmente) la teoría del proceso de los altos hornos.

De esta manera, hemos conseguido mejorar nuestros conocimientos sobre el tema, así como ampliar el espectro de estudio que se lleva a cabo en la carrera, lo cual se considera indispensable para acudir al mundo laboral con garantías de éxito.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Aleación:** combinación de propiedades metálicas compuesta por dos o más elementos metálicos sólidos. En general, suelen considerarse mezclas, aunque en ocasiones algunas aleaciones pueden generar compuestos químicos.
- **Corrosión:** deterioro de un material debido a un ataque electroquímico por su entorno. También puede definirse como la tendencia que tienen los materiales a buscar su forma de mayor estabilidad o de menor energía interna. Se trata de un proceso natural y espontáneo.
- **Diagrama Hierro-Carbono**: donde se representan las transformaciones que sufren los aceros al carbono con la temperatura, suponiendo que el calentamiento o enfriamiento de la mezcla se produce muy lentamente, de manera que los procesos de difusión (homogeneización) tendrán tiempo para completarse. Se obtiene de manera experimental mediante la identificación de los puntos críticos (temperaturas a las que se producen las transformaciones) por diversos métodos.
- **Ductilidad**: propiedad que presentan ciertos materiales que, bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse plásticamente de manera sostenible sin romperse.
- **Dureza**: oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura, las deformaciones permanentes, etc.
- **Electrólisis**: proceso que separa los elementos de un compuesto mediante la electricidad. Durante este proceso, tiene lugar la captura de electrones por los cationes en el cátodo (una reducción) y la liberación de electrones por los aniones en el ánodo (una oxidación).
- **Fragilidad**: capacidad que posee un material para fracturarse con escasa deformación. Es lo contrario a la tenacidad.
- **Laminación**: proceso industrial donde se reduce el espesor de una lámina de metal o material semejante mediante la aplicación de presión. La máquina que realiza este proceso se denomina laminador.
- **Maleabilidad**: propiedad que posee un material duro para adquirir una deformación mediante una descompresión sin romperse.
- **Material refractario**: propiedad de determinados materiales para soportar altas temperaturas sin descomponerse.

- **Soplantes**: son las máquinas encargadas de darle presión suficiente al aire para que recorra todo el circuito del horno encargado de inyectar el aire a su interior.
- **Templabilidad**: propiedad que determina la profundidad y distribución de la fuerza inducida mediante el templado a partir de la condición austenítica. Un acero aleado de alta templabilidad es aquel que endurece en la superficie y en su interior. La templabilidad es una medida de la profundidad a la cual una aleación puede endurecerse.
- **Tenacidad**: resistencia que opone un material a ser molido, roto, doblado, desgarrado o suprimido. También, energía de deformación total que es capaz de absorber o acumular antes de romperse.
- **Tundish**: se llama tundish o artesa al recipiente que recibe el acero líquido de la cuchara y lo distribuye por medio de las buzas a las líneas de colada.

BIBLIOGRAFÍA

A. Rist and N. Meysson, *A Dual Graphic Representation of the Blast-Furnace Mass and Heat Balances*

Francisco Soler Preciado, *Tipos de Acero*, http://www.atmosferis.com/tipos-de-acero/

Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), *El Proceso Siderúrgico*

Metales y Metalurgia, *La producción mundial de acero crudo crece un 5 % en abril*, http://www.metalesymetalurgia.com/?cat=370

M. Geerdes, H. Toxopeus, C. van der Vliet, *Modern Blast Furnace Ironmaking*

Steeluniversity, *Blast Furnace Simulation User Guide*

ULCOS Process, http://ulcos.org/en/about_ulcos/home.php

Weldg, *Fabricación y Procesamiento del Acero*, https://metfusion.wordpress.com/2013/10/14/fabricacion-y-procesamiento-del-acero/

World Steel Association, *Steel Statistical Yearbook 2016*, https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:44ae2d3d-62ff-4868-9f60-e17a43e75092/Crude+steel+production+May+2017.pdf