

PROCESOS DE FABRICACION DE METALES FERROSOS

GUIA DE ESTUDIO DE LA UNIDAD I

REDUCCION DE LOS OXIDOS DE HIERRO

1.1 Materias primas (Pelet, Coque, Sinter, Fundentes)

El arrabio es un producto intermedio del proceso de fundición de las menas del hierro tratadas con coque como combustible y caliza como fundente. También se han usado como combustibles el carbón vegetal y la antracita. Se obtiene como material fundido en un alto horno mediante reducción del mineral de hierro.

Se utiliza como materia prima en la obtención del acero en los hornos siderúrgicos. El arrabio tiene un alto contenido en carbono, generalmente entre 3.5–4.5%, además de sílice y otras impurezas, que lo hacen muy frágil por lo que tiene limitados usos como material. Los materiales básicos empleados para fabricar arrabio son **mineral de hierro, coque y caliza**.

✂ **Mineral de hierro:** El hierro es el metal más abundante de la corteza terrestre tras el aluminio (bauxita). Se encuentra. En la naturaleza se encuentra combinado en formando diferentes minerales siendo de interés industrial únicamente 5 o 6 de ellos: la magnetita, los hematítes, la siderita, limonita, ilmenita y en casos especiales la taconíta o piritita.

En yacimientos, el mineral útil (mena) está acompañado de impurezas y minerales que no son útiles (ganga) para la siderurgia, por lo que antes de comenzar el proceso siderúrgico hay que someterlo a una serie de tratamientos:

- Tratamientos mecánicos (cribado, triturado y molienda): para facilitar tratamientos posteriores.
- Tratamientos de separación (hidrodinámicos, por flotación y/o por arrastre): para concentrar la mena separándola de la ganga.
- Tratamientos térmicos (calcinación y tostación): para facilitar reducciones (reacciones químicas) posteriores y eliminar impurezas volátiles.
- Tratamientos de aglomeración (briqueteado, nodulación, sinterización y pelletización): para aglomerar los finos y evitar el bloqueo de los intersticios o huecos en el interior de los altos hornos.

Tal preparación significa que los minerales que contienen hierro (hematita, magnetita) se trituran, se clasifican y se aglomeran, mediante sinterización, para formar pelotillas, nódulos o briquetas, a fin de tener el mineral concentrado y preacondicionado para alimentarlo a los hornos altos. La preparación del mineral puede generar grandes cantidades de desechos producir emisiones de polvo y dióxido de azufre.



Magnetita



Hematita



Limonita



Siderita



Pirita



Ilmenita

3.1. PELLETS

Pelotillas de 15mm a 25 mm de diámetro, de color negro y poseen buena resistencia mecánica, con 65 % de Fe



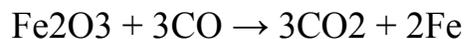
- ✓ Fe_2O_3 .HEMATITES, contiene 70% de Fe y 30% de O_2 , poco P y S.
- ✓ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ LIMONITAS, (o hematita pardo) contiene 60% de Fe y 14% de aguas de cristalización, el contenido en P varía grandemente.
- ✓ Fe_3O_4 MAGNETITA; contiene 72.4% de Fe y 27.6% de O_2 , contenido en P varía grandemente.
- ✓ FeCO_3 SIDEROSA; contiene 40.2% en Fe y 37.4 en CO_2 bajo contenido en Mn, Mg y Ca.
- ✓ FeS_2 PIRITAS; contiene 46.6 % de Fe y alto contenido de azufre (mayor de 45% en S) no utilizado como menas de hierro

Figura 1. Minerales comunes para el beneficio de Hierro y la producción de pellets.

⌘ **Coque siderúrgico:** es el residuo sólido obtenido de la destilación o combustión en ausencia de aire (pirólisis) de mezclas de hasta 12 carbones. De esta forma se obtiene un combustible sólido compuesto en un 90-95% de carbono Sus funciones son:

- **Combustible:** al reaccionar con el oxígeno del aire que entra en el alto horno a través de las toberas aporta el calor necesario para fundir la mena.
- **Reductor:** aporta el monóxido de carbono responsable de la reducción del hierro. Una pequeña parte reacciona con el hierro fundido.
- **Soporte:** de la carga en el interior del alto horno facilitando la combustión y el tránsito del hierro y escoria en sentido descendente y de los gases en sentido ascendente.

El coque se quema como combustible para calentar el horno, y al arder libera monóxido de carbono, que se combina con los óxidos de hierro del mineral y los reduce a hierro metálico. La ecuación de la reacción química fundamental de un alto horno es:



Producción de coque y recuperación de subproductos

El coque es producido por el calentamiento de carbón bituminoso, que expulsa los componentes volátiles. El coque es empleado como agente de reducción, en los hornos altos que producen hierro, para extraer el metal del mineral; durante este proceso, cierta cantidad de carbón se disuelve en el hierro líquido.

El proceso de formación del coque o coquificación, desprende grandes cantidades de gas conteniendo monóxido de carbono; esto facilita la producción de toda una serie de químicos: alquitrán mineral, aceites livianos crudos (conteniendo benceno, tolueno, xileno), amoníaco, naftaleno, y cantidades importantes de vapor.

La mayoría de estas sustancias pueden ser recuperadas y refinadas como productos químicos; el resto del gas del horno de “coquificación” se emplea internamente en los diferentes procesos y hornos para calefacción, y su excedente de gas puede ser utilizado para generar energía eléctrica, o como materia prima para la producción de químicos.

La producción de coque produce grandes cantidades de aguas servidas que contienen amoníaco y otros componentes liberados durante el proceso de coquificación. Esta agua contiene concentraciones potencialmente tóxicas de fenoles, cianuro, tiocianato, amoníaco; sulfuro y cloruro. La producción de coque emite humo visible, polvo de coque, y la mayoría de las sustancias volátiles mencionadas anteriormente.

2.- Obtención del coque

❖ Se **obtiene** a partir de hullas grasas con menos del 1% de azufre y menos del 8% de cenizas.

❖ El **proceso de generación** de coque consiste en la introducción de carbón en un horno de la batería y dejarlo coquizando (calentando / quemando) durante un tiempo entre 10-24 horas (dependiendo del tamaño del horno).

❖ La **misión del coque** en el proceso siderúrgico es:

- Producir, por combustión, el **calor necesario** para las reacciones químicas de reducción del hierro (eliminación del oxígeno), así como fundir la mena dentro del horno.
- Producir un **gas reductor** (CO) que transforma los óxidos en arrabio.
- Dar **permeabilidad** a la carga del alto horno.



J.M.F.- Nov., 2011

5



• La coquización es una forma energética de craqueo térmico utilizada para obtener gasolina de destilación directa (nafta de coquificador) y diversas fracciones de destilación intermedia, que se utilizan como materiales para craqueo catalítico. Por este proceso, el hidrógeno de la molécula de hidrocarburo se reduce de forma tan completa, que el residuo es una forma de carbono casi puro, denominado coque.

Coquización

Coque

• Combustible obtenido de la calcinación o destilación seca de carbón mineral; está compuesto de carbono y tiene un alto poder calorífico

• Es usado principalmente en la metalurgia de menas ferruginosas y no ferruginosas.

• Las propiedades coquizantes describen el comportamiento del carbón durante la fabricación del coque, estos se determinan a través de los ensayos de plastometría, desgasificación y dilatometría, los cuales se realizan a velocidades de calentamiento más parecidas a las del horno de coquización.

Propiedades

Figura 2. Proceso de coquización.

Las influencias más importantes del coque son las siguientes:

- El coque es la fuente del gas de CO que se usa para reducir los óxidos de hierro a hierro metálico.
- El coque se consume y genera el calor que se usa para fundir la carga.
- La carga en capas alternas de mineral y coque crea una estructura de coque a través de la cual se distribuye el gas reductor y penetra en las capas de mineral. Cuando el mineral se funde la carga consiste sólo de coque, la carga del alto horno es soportada por esta estructura que también se requiere que sea permeable para permitir que se acumule el hierro y la escoria en el crisol.
- El coque provee el carbono para la carburación del arrabio.

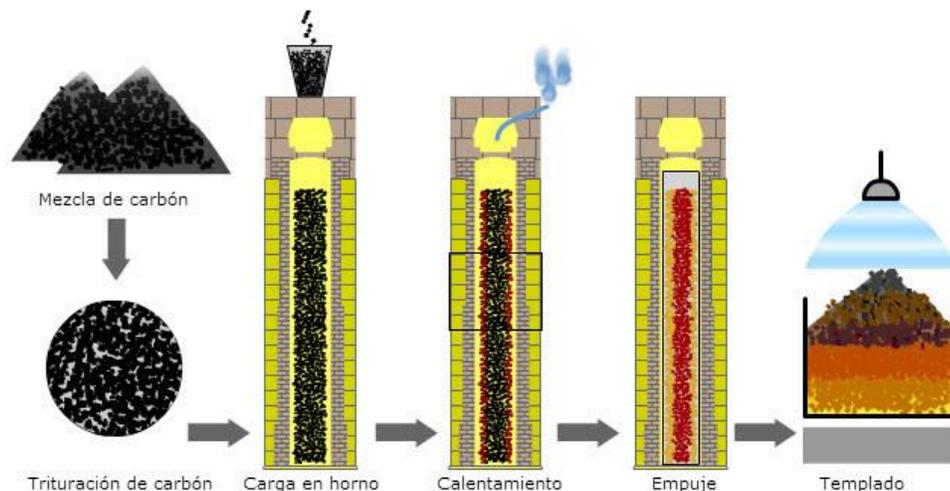


Figura 3. El coque se produce calentado una mezcla homogénea de carbones a aproximadamente 1200°C en un ambiente libre de aire. La materia volátil en el carbón se escapa cuando aumenta la temperatura y se forma una matriz de carbón sólido, proceso denominado carburación del carbón. El carbón se calienta de las paredes hacia el centro, formando la zona de plasticidad. Después de 16-24 horas la zona de plasticidad alcanza el centro y se completa el proceso de coquización. El coque es empujado de la cámara de coquización y templado para asegurarse de que el coque caliente no reaccione con el oxígeno.

La calidad del coque se describe por su composición y resistencia. Las propiedades importantes de la composición son la ceniza (generalmente 8-11%), la humedad, el azufre y el contenido alcalino. Las propiedades físicas relevantes del coque son las siguientes:

- **Tamaño y distribución del tamaño:** El tamaño promedio típico es de 45-55 mm. La distribución debe ser pequeña para asegurar una alta permeabilidad.
- **Resistencia a la degradación física:** Durante el transporte y manipuleo el tamaño y la distribución del tamaño cambian debido a la degradación física.
- **Resistencia a la abrasión:** La abrasión ocasiona la generación de finos.
- **Reactividad del coque:** El coque reacciona con el CO₂ cambiando su matriz lo que lleva a un mayor consumo de coque en el horno. El coque con una reactividad baja y una mayor resistencia después de la reacción tiene una mayor resistencia mecánica en la parte baja del horno.

☞ **El Sinter** es una materia prima primordial para el proceso del alto horno, principal reactor a nivel mundial empleado para la producción de hierro de primera fusión.

Su producción se lleva a cabo en una máquina integrada por una cadena sin fin con una sección de ignición en el extremo inicial del recorrido y un sistema de succión de aire por la parte inferior para fomentar la combustión y en consecuencia la fusión incipiente de algunos componentes de la mezcla.

La materia prima consiste en una mezcla de finos de mineral de hierro, finos de coque, finos de pelet y fundentes, además, el proceso emplea gas de coque y aire de la atmósfera.

El proceso de sinterización consiste en aglomerar por fusión incipiente de una mezcla de minerales de hierro, fundentes y coque, con granulometría menor a 8 mm, el sinter ideal para la carga del alto horno deberá estar en el rango de tamaños de 12 a 35 mm, y debe poseer propiedades mecánicas que aseguren su integridad granulométrica bajo las presiones y temperaturas del horno.

Antes de su paso por la máquina de sinterización, la mezcla mineral se somete previamente a una granulación, que consiste en homogenizar la mezcla en un tambor giratorio, con la adición de un 6-8 % de agua, durante unos minutos.

Los nódulos formados se cargan sobre la parrilla de la banda de sinterización, donde la temperatura de la carga se eleva entre 1200 y 1350 °C para producir la fusión parcial y producir material semifundido, el cual, durante el enfriamiento posterior, cristaliza en varias fases minerales de distinta composición química y morfológica.

Estas fases son: hematita no asimilada o residual, también denominada hematita primaria; hematita precipitada o hematita secundaria; magnetita; silicoferritos de calcio y aluminio (SFCA) y ganga formada, principalmente, por silicatos de calcio, hierro y magnesio.



Figura 4. Sinter para alto horno.

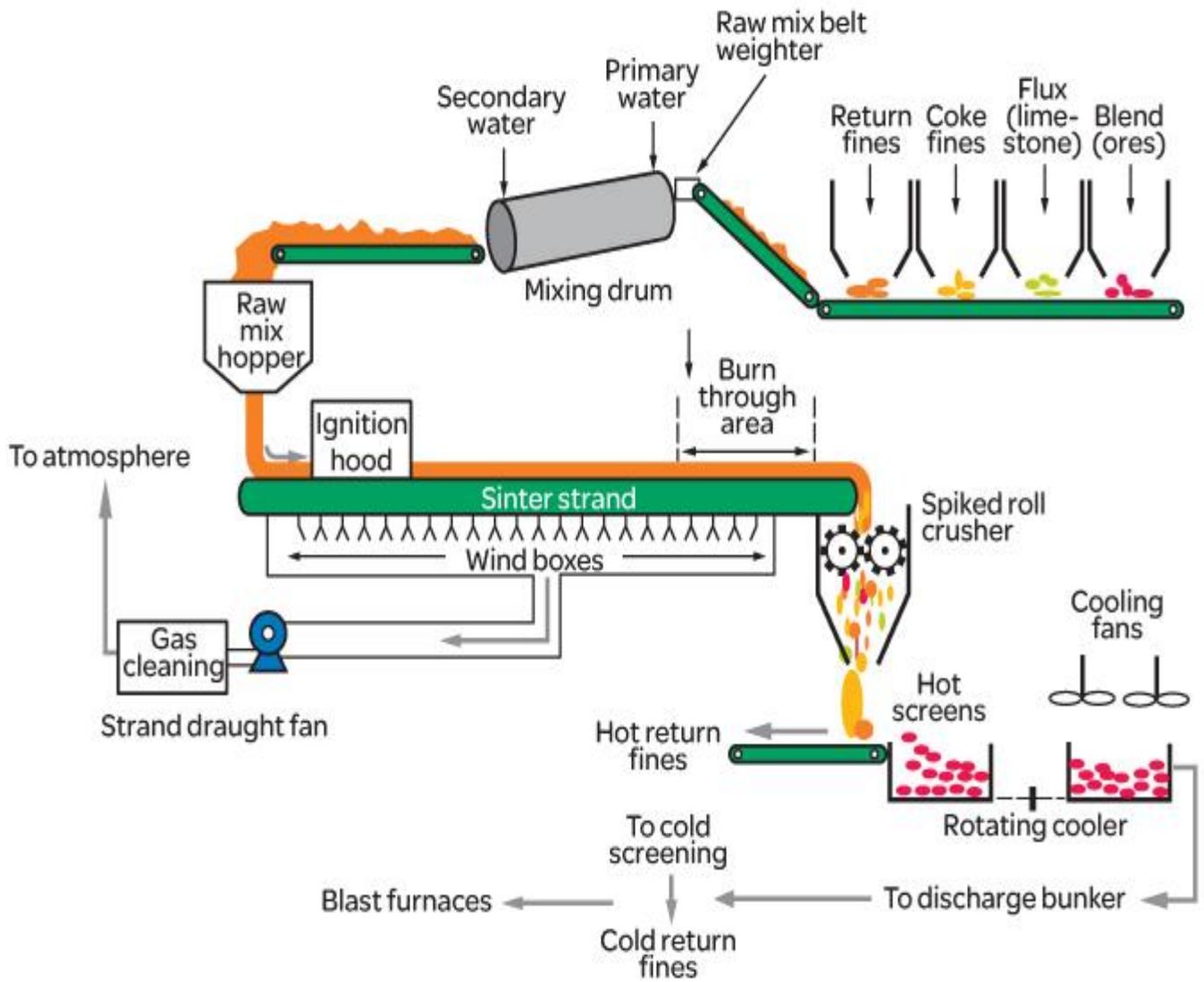


Figure 1: Simplified diagram of a sinter plant

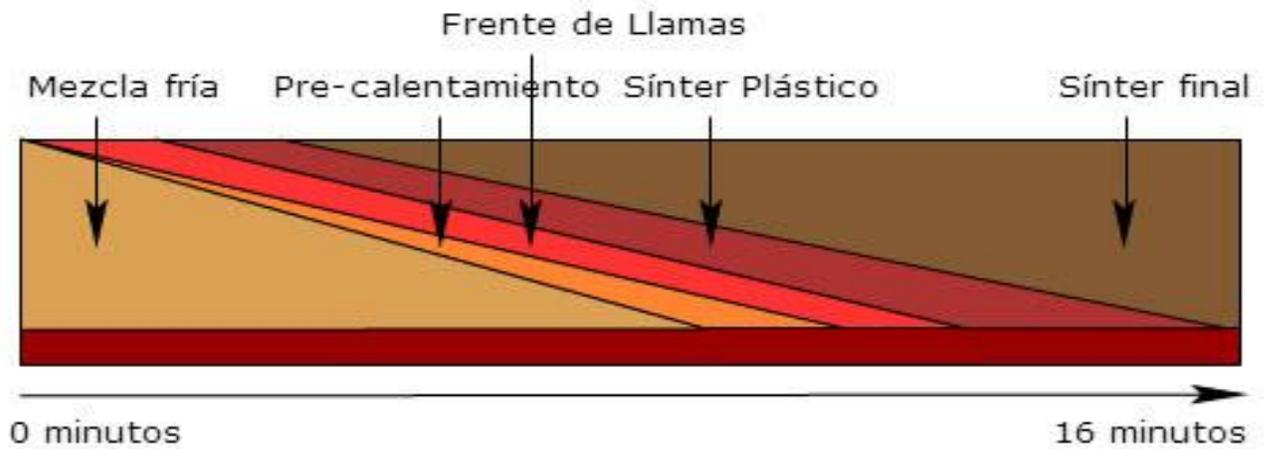


Figura 5. Diagrama simplificado de una planta de sinter para alto horno.

✂ **Los Fundentes** tiene como función combinarse con la ganga y con las impurezas impidiendo la formación de compuestos de hierro indeseados de alto punto de fusión.

La cantidad de fundente y su naturaleza debe establecerse con mucho cuidado, dependiendo de la naturaleza y composición de la ganga y la proporción de impurezas.

Generalmente se emplea piedra caliza (cal) que evita la formación de silicatos de hierro (de alto punto de fusión), formando silicato cálcico que tras fundirse flota sobre el arrabio líquido y se elimina a través de la bigotera junto con otras impurezas formando la escoria.

La escoria formada sirve para la fabricación de cementos, lana de escoria, fertilizantes...

La caliza de la carga del horno se emplea como fuente adicional de monóxido de carbono y como sustancia fundente. Este material se combina con la sílice presente en el mineral (que no se funde a las temperaturas del horno) para formar silicato de calcio, de menor punto de fusión. Sin la caliza se formaría silicato de hierro, con lo que se perdería hierro metálico.

El silicato de calcio y otras impurezas forman una escoria que flota sobre el metal fundido en la parte inferior del horno. El arrabio producido en los altos hornos tiene la siguiente composición: un 92% de hierro, un 3 o 4% de carbono, entre 0,5 y 3% de silicio, del 0,25% al 2,5% de manganeso, del 0,04 al 2% de fósforo y algunas partículas de azufre.

Las cargas (mena de hierro, coque y fundente) se introducen a intervalos regulares a través de los tragantes, con dispositivos de doble campana para no dejar escapar los gases del interior del horno. A medida que las cargas comienzan su camino descendente, se producen diferentes reacciones entre éstas y los gases ascendentes.

- Primero se produce la deshidratación en la parte superior de la cuba; y después la reducción en la parte inferior de la cuba.
- En el etalaje, el hierro comienza a fundirse (zona de fusión) y a combinarse en cierto grado con el carbón de coque (zona de carburación).
- Tras alcanzar el crisol, el arrabio se sangra (sangrado de alto horno o colada) a través de la piquera hacia las lingoteras (para obtener los lingotes de primera fusión, al enfriarse) o hacia las cucharas (recipientes de acero recubiertos interiormente de material refractario) manteniéndose el arrabio en estado líquido.

3. MATERIALES UTILIZADOS

PELLETS



FUNDENTE



COKE



3.3. EL FUNDENTE.

ES EL MINERAL DE CaCO_3 , QUE TIENE COMO FUNCIÓN PRINCIPAL LA COMBINACIÓN CON LAS IMPUREZAS (P, S, SI, ETC.) EXISTENTES EN EL MATERIAL DE HIERRO O EN PROPORCIONES REDUCIDAS DE LOS PELLETS FORMÁNDOSE ASÍ LA ESCORIA.



Figura 6. Fundente para alto horno.

Un alto horno típico está formado por una cápsula cilíndrica de acero forrada con un material no metálico y resistente al calor, como amianto (asbesto) o ladrillos refractarios. El diámetro de la cápsula disminuye hacia arriba y hacia abajo, y es máximo en un punto situado aproximadamente a una cuarta parte de su altura total.

La parte inferior del horno está dotada de varias aberturas tubulares llamadas toberas, por donde se fuerza el paso del aire. Cerca del fondo se encuentra un orificio por el que fluye el arrabio cuando se sangra (o vacía) el alto horno. Encima de ese orificio, pero debajo de las toberas, hay otro agujero para retirar la escoria. La parte superior del horno, cuya altura es de unos 30 m, contiene respiraderos para los gases de escape, y un par de tolvas redondas, cerradas por válvulas en forma de campana, por las que se introduce la carga en el horno. Los materiales se llevan hasta las tolvas en pequeñas vagonetas o cucharas que se suben por un elevador inclinado situado en el exterior del horno.

Los altos hornos funcionan de forma continua. La materia prima que se va a introducir en el horno se divide en un determinado número de pequeñas cargas que se introducen a intervalos de entre 10 y 15 minutos. La escoria que flota sobre el metal fundido se retira una vez cada dos horas, y el hierro se sangra cinco veces al día.

El aire insuflado en el alto horno se precalienta a una temperatura comprendida entre los 550 y los 900 °C. El calentamiento se realiza en las llamadas estufas, cilindros con estructuras de ladrillo refractario. El ladrillo se calienta durante varias horas quemando gas de alto horno, que son los gases de escape que salen de la parte superior del horno. Después se apaga la llama y se hace pasar el aire a presión por la estufa. El peso del aire empleado en un alto horno supera el peso total de las demás materias primas.

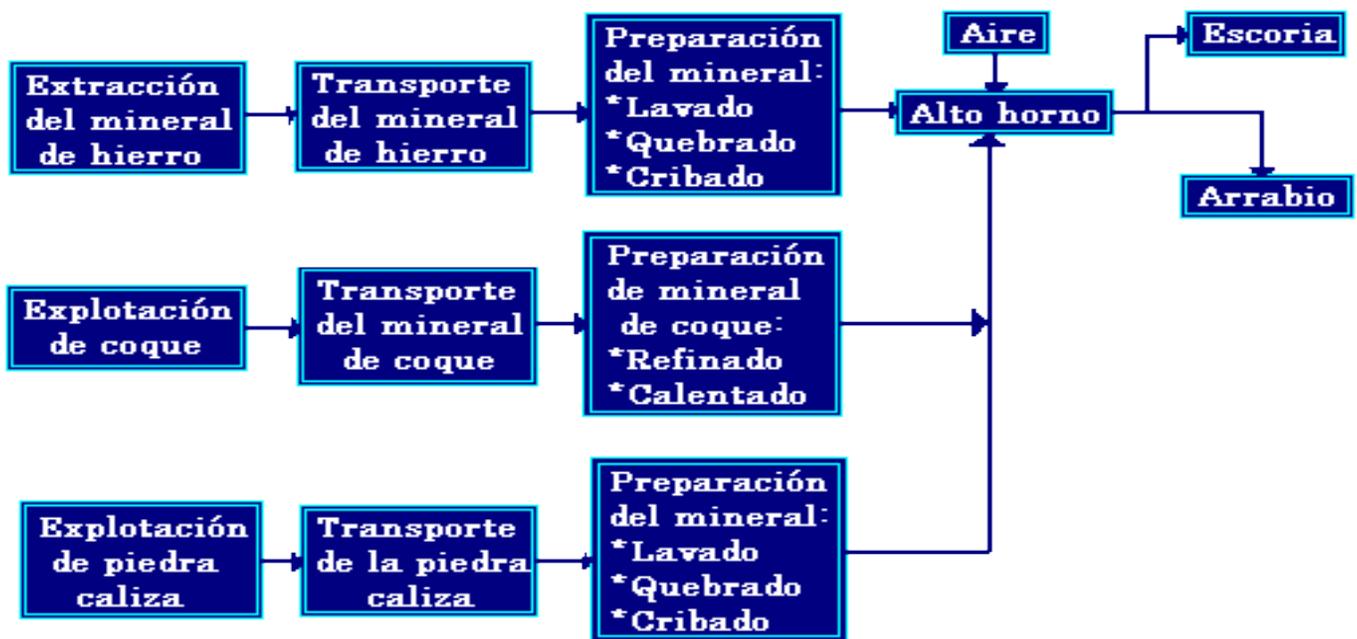


Figura 7. Diagrama del procesamiento y obtención de arrabio.

Después de la Segunda Guerra Mundial se introdujo un importante avance en la tecnología de altos hornos: la presurización. Estrangulando el flujo de gas de los respiraderos del horno es posible aumentar la presión del interior del horno hasta 1,7 atmósferas o más. La técnica de presurización permite una mejor combustión del coque y una mayor producción de hierro.

En muchos altos hornos puede lograrse un aumento de la producción de un 25%. En instalaciones experimentales también se ha demostrado que la producción se incrementa enriqueciendo el aire con oxígeno.

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 a un depósito metálico forrado de ladrillo, que puede ser una cuchara o una vagoneta capaz de contener hasta 100 toneladas de metal.

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. Los altos hornos modernos funcionan en combinación con hornos básicos de oxígeno, y a veces con hornos de crisol abierto, más antiguos, como parte de una única planta siderúrgica. En esas plantas, los hornos siderúrgicos se cargan con arrabio.

El metal fundido procedente de diversos altos hornos puede mezclarse en una gran cuchara antes de convertirlo en acero con el fin de minimizar el efecto de posibles irregularidades de alguno de los hornos.

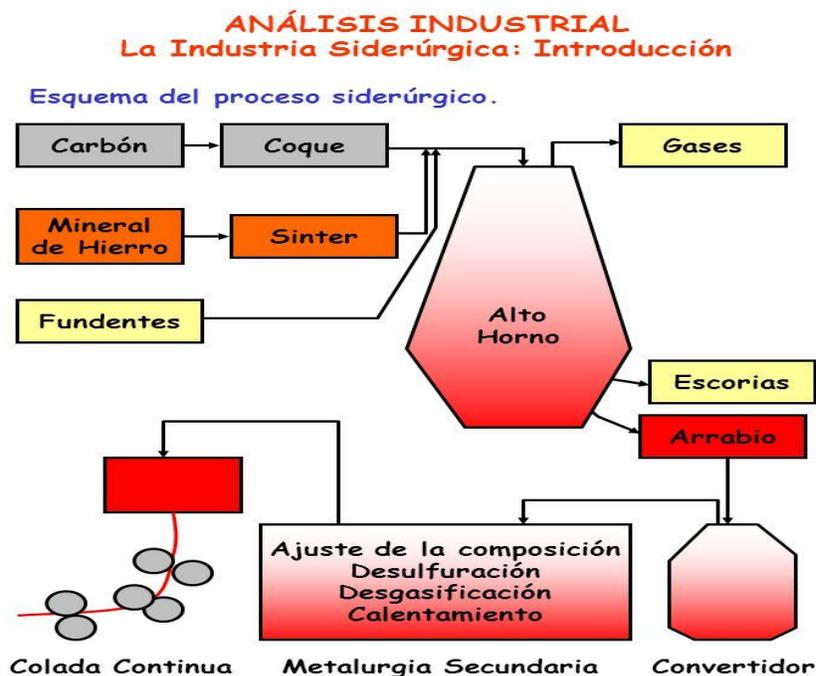


Figura 8. Diagrama del procesamiento y obtención de acero.

1.2. Termodinámica y cinética de la reducción de óxidos.

La mayor parte de las reacciones pirometalúrgicas son heterogéneas, es decir, la interacción se realiza entre sustancias que se encuentran en diferentes fases. La combustión del carbón en los hornos y la reducción de los óxidos de hierro por los gases del horno pueden servir de ejemplo de este tipo de reacciones. (1) y (2)

1. La transferencia de las sustancias reaccionantes a la interfase, es decir, a la zona de la
2. reacción.
3. El acto químico de la interacción propiamente dicho.
4. La evacuación de todos los productos de la zona de reacción.

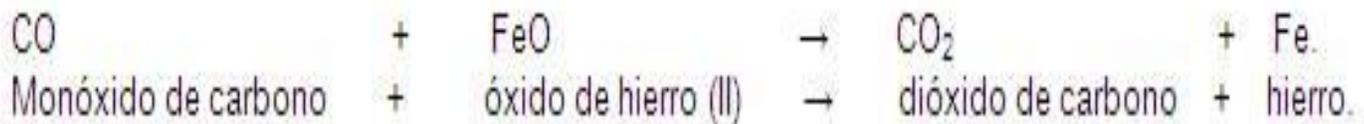
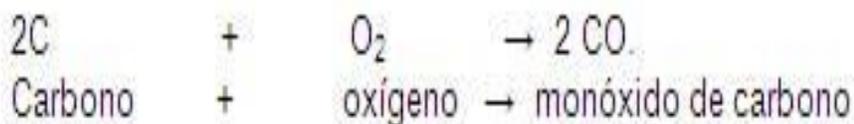
Cada etapa puede estar constituida por una serie de subetapas.

La formación de CO es favorecida por:

- incremento de la temperatura
- disminución de la presión
- baja relación CO/CO₂.

La formación de CO₂ es favorecida por:

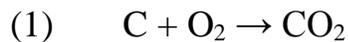
- disminución de la temperatura
- aumento de la presión
- alta relación CO/CO₂.



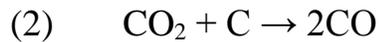
Se puede obtener hierro a partir de los óxidos con más o menos impurezas. Muchos de los minerales de hierro son óxidos, y los que no se pueden oxidar para obtener los correspondientes óxidos.

La reducción de los óxidos para obtener hierro llevada a cabo en el *alto horno*, como se ha señalado se añaden los minerales de hierro en presencia de coque, C, y carbonato de calcio, CaCO₃, que actúa como escorificante.

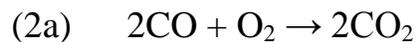
Los gases sufren una serie de reacciones; el coque puede reaccionar con el oxígeno para formar dióxido de carbono:



A su vez el dióxido de carbono puede reducirse para dar monóxido de carbono:



Aunque también se puede dar el proceso contrario al oxidarse el monóxido con oxígeno para volver a dar dióxido de carbono:



El proceso de oxidación de coque con oxígeno libera energía y se utiliza para calentar (llegándose hasta unos 1900 ° C en la parte inferior del horno).

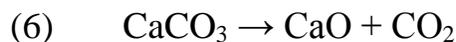
En primer lugar los óxidos de hierro pueden reducirse, parcial o totalmente, con el monóxido de carbono, CO; por ejemplo:



Después, conforme se baja en el horno y la temperatura aumenta, reaccionan con el coque (carbono en su mayor parte), reduciéndose los óxidos. Por ejemplo:



El carbonato de calcio (caliza) se descompone:



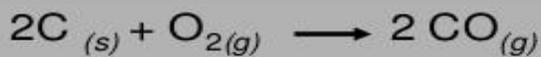
Y el dióxido de carbono es reducido con el coque a monóxido de carbono como se ha visto antes.

Más abajo se producen procesos de carburación:



Finalmente se produce la combustión y desulfuración (eliminación de azufre) mediante la entrada de aire. Y por último se separan dos fracciones: la escoria y el arrabio: hierro fundido, que es la materia prima que luego se emplea en la industria.

5. REACCIONES DE FORMACION DEL ARRABIO



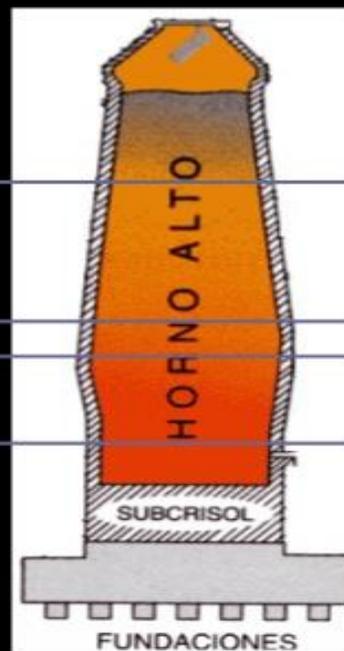
Reducción Indirecta



Reducción directa



Carburización



6. ZONA DE REACCIÓN

I. ZONA: 150° A 400° C DE TEMPERATURA

- eliminación del agua higroscópica

II. ZONA: 400° A 700° C

- a) Reducción indirecta de los óxidos de hierro:



- b) Solución del carbono por reacción de CO₂:



- c) Descomposición de los Óxidos de manganeso:



Figura 9. Zonas de reacción del Alto Horno.

III ZONA: 700° A 1,350° C (absorción de calor)

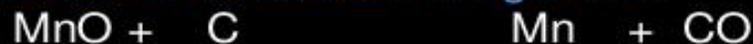
- Reducción directa del óxido ferrico:



- Disociación de los carbonatos:



- Reducción de los óxidos de manganeso:



- Formación de la escoria primaria, silicatos:

- El silicio existente en el mineral forma de sílice (SiO_2),



IV ZONA: 1,360° A 1,550° C

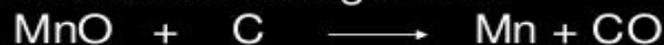
- En esta zona, el hierro conserva un estado semisólido pastoso y esponjoso, mezclado aún con parte de la ganga aún no disuelta totalmente:

Carburación de la fundición:



Reducción de óxidos y formación de escorias:

- Reducción directa del manganeso:



- Reducción directa del silicio:



- Reducción del fósforo:

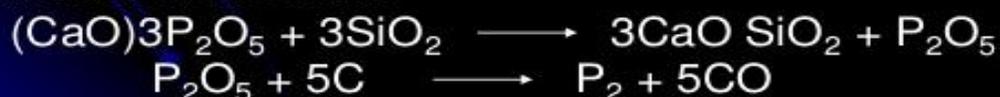


Figura 9 bis. Zonas de reacción del Alto Horno.

1.2.1. Reducción de óxidos de hierro por medio de monóxido de carbono.

El mineral cargado por el tragante contiene el hierro en forma de óxidos Fe_2O_3 y Fe_3O_4 , también puede existir FeO procedente de la calcinación del carbonato y al reducirse el Fe_3O_4 por el CO . El óxido de carbono es el principal reductor de los óxidos de hierro. Las reacciones se efectúan entre el gas y los sólidos, son ligeramente exotérmicas y se producen a temperatura relativamente baja.

El óxido férrico Fe_2O_3 se reduce a $400\text{ }^\circ\text{C}$ por el óxido de carbono, según una reacción reversible que produce el óxido magnético en la parte superior de la cuba:



El óxido magnético Fe_3O_4 , se reduce a su vez entre $600\text{ }^\circ\text{C}$ y $700\text{ }^\circ\text{C}$ y, según la concentración de CO , se puede producir las dos reacciones siguientes, en la parte media de la cuba:



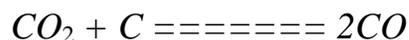
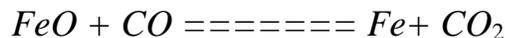
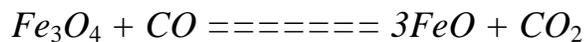
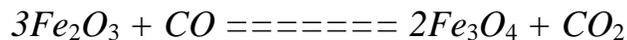
El óxido ferroso introducido en la carga o resultante de la reacción (2) se reduce a su vez entre $900\text{ }^\circ\text{C}$ y $1000\text{ }^\circ\text{C}$, en el vientre del alto horno:



La primera reacción se produce con mucha facilidad. Por encima de $600\text{ }^\circ\text{C}$ pueden existir en equilibrio los cuatro cuerpos: Fe_3O_4 , FeO , CO y CO_2 con proporciones convenientes de CO y CO_2 .

En la carga también se encuentran otros óxidos como el MnO , el SiO_2 y el P_2O_5 (anhídrico fosfórico) que pasan a formar la escoria que sobrenada en el baño metálico.

Reacciones de reducción por el CO :



Las curvas de Chaudron señalan las posibles reacciones teóricas que se pueden producir a diversas temperaturas entre los óxidos de hierro Fe_2O_3 , Fe_3O_4 y FeO con diferentes proporciones de CO y CO_2 . Es decir, estas curvas señalan las proporciones de CO que se deben rebasar para que se pueda producir a diversas temperaturas la reducción de los diferentes óxidos de hierro.

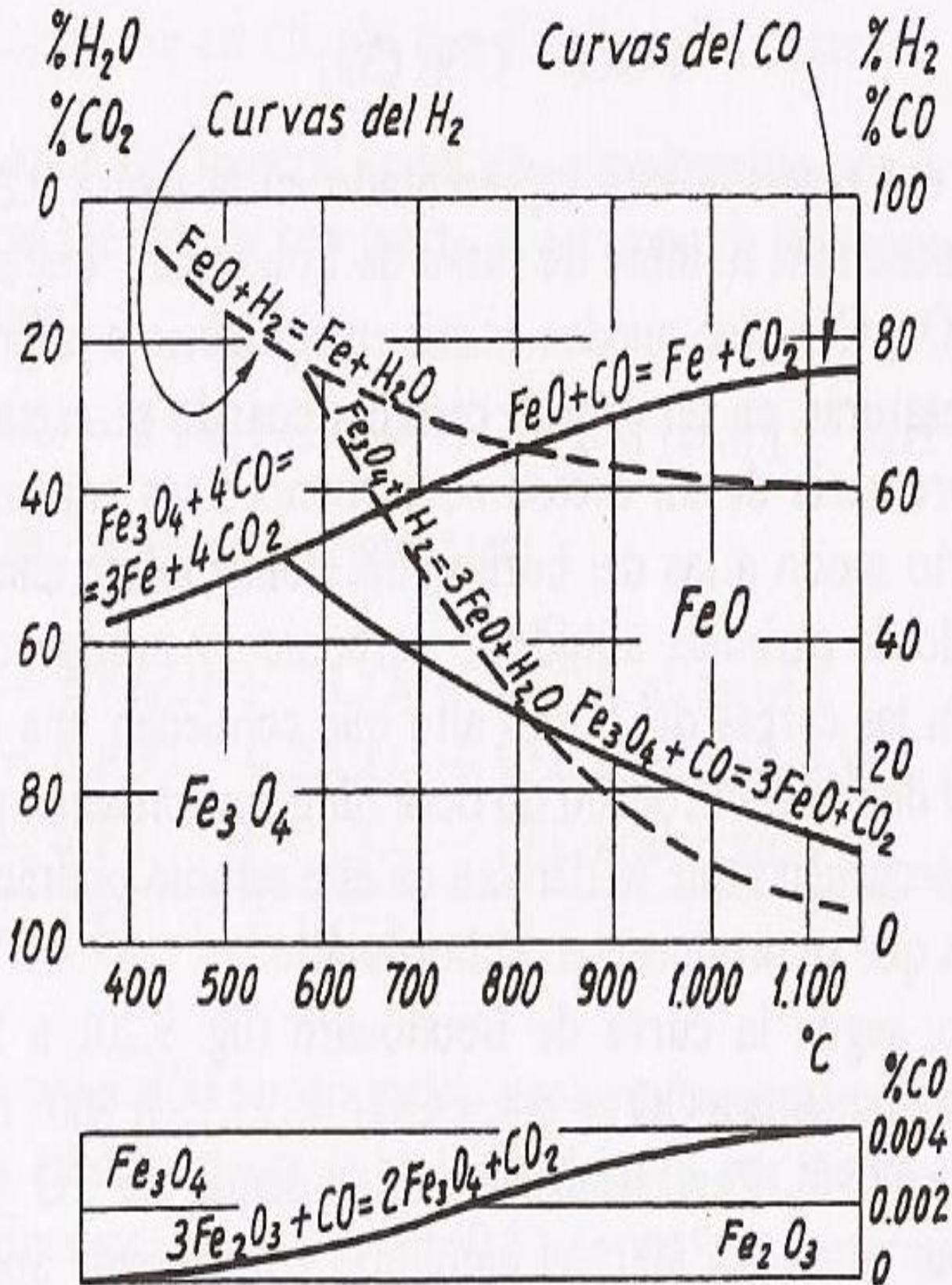


Figura 10. Curvas de Chaudron.

A temperaturas superiores a 555 °C, la reducción de los óxidos de hierro por la acción de mezclas de CO y de CO₂ se realiza en tres etapas sucesivas, avanzando las transformaciones en la siguiente forma:



A temperaturas inferiores a 555 °C, el paso de Fe₂O₃ a Fe se verifica solamente a través del Fe₃O₄, sin la aparición de la fase FeO intermedia.

Es interesante indicar que el óxido de hierro FeO, denominado *wustita*, no es estable a la temperatura ambiente, y normalmente no se encuentra libre en forma estable en la naturaleza, donde aparece en forma combinada, y sólo en algunas ocasiones se presenta, pero en forma inestable. El FeO solamente es estable a temperaturas superiores a 560 °C. (4).

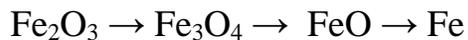
Teóricamente, las transformaciones Fe₃O₄ → FeO y FeO → Fe por la acción del CO, sólo pueden producirse a temperaturas superiores a 555 °C.

Las principales reacciones que produce el CO en la reducción de los óxidos de hierro citados y señalados en la figura 2 son las siguientes:

Se observa en la figura 2 que bastan pequeñísimos porcentajes de CO en los gases, inferiores a 0.003 %, que son casi despreciables, para que en el intervalo 400 - 900 °C se verifique a diversas temperaturas, las transformaciones señaladas anteriormente; de acuerdo con la figura son:



A 500 °C concentraciones 0,0005 % CO 48



A 700 °C concentraciones 0,0015 % CO 38 60

A 900 °C concentraciones 0,0030 % CO 25 68

A 700 °C, por ejemplo, para que teóricamente se produzca la reducción Fe₂O₃ → Fe₃O₄ → FeO, hay que sobrepasar la proporción de 38 % de CO en los gases; y para que se complete la reducción FeO → Fe, hay que rebasar la proporción de 60 % de CO.

A 900 °C para que se realice la transformación Fe₃O₄ → FeO, teóricamente, hace falta sobrepasar la proporción de 25 % de CO en los gases; y para la reducción FeO → Fe, el porcentaje de CO debe ser superior a 68 %.

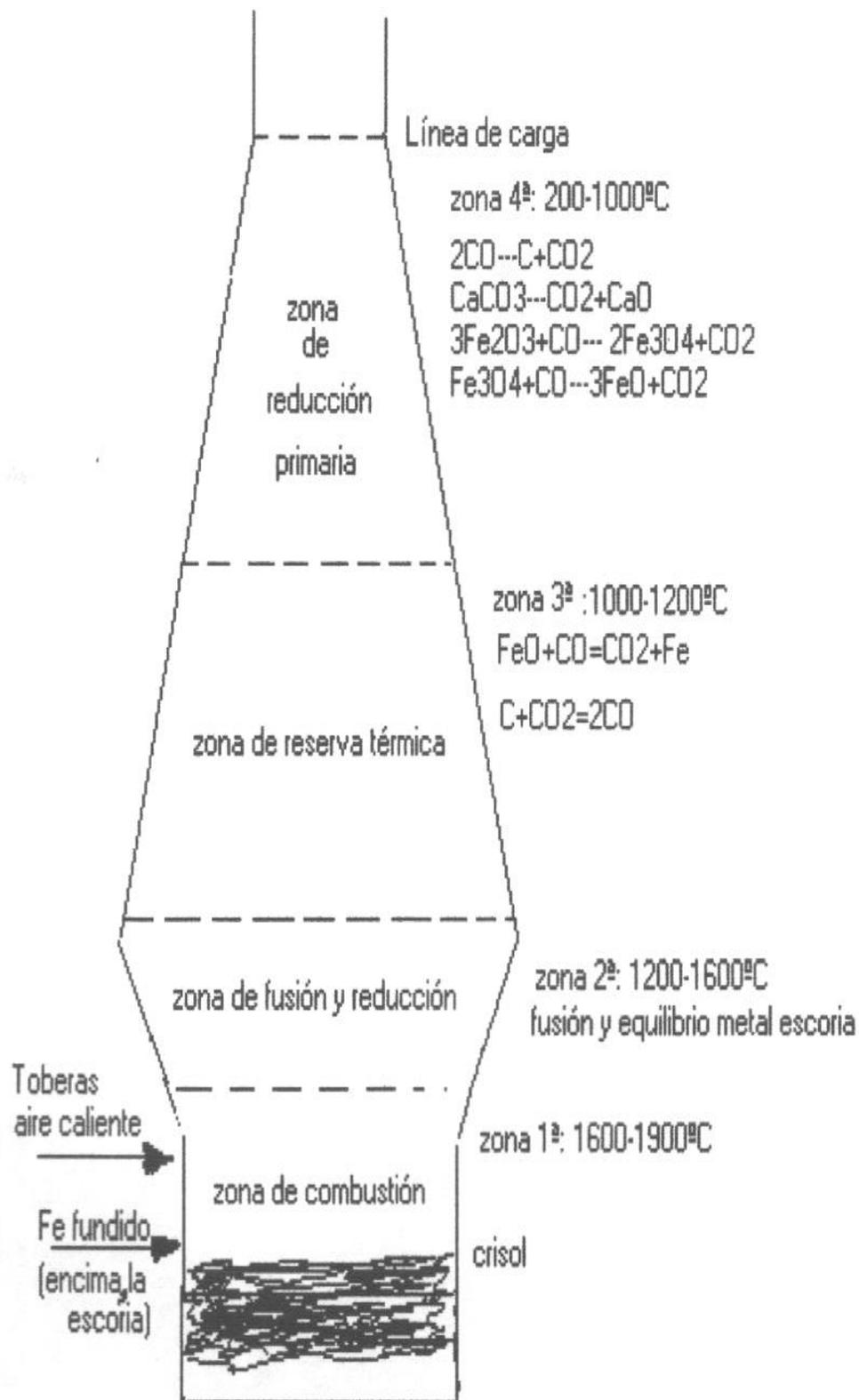


Figura 11. Ejemplo de las zonas de reacción dentro del Alto Horno y su reducción por CO

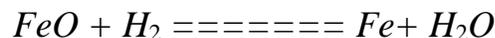
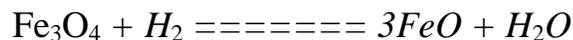
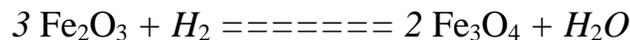
1.2.1. Reducción de óxidos de hierro por medio de hidrógeno.

En calidad de reductores de los óxidos de hierro en el alto horno sirven el carbono y el hidrógeno. La reducción por carbono se llama reducción directa y la reducción por gases, reducción indirecta. Sin embargo, la interacción directa del carbono con los óxidos sólidos está limitada por el contacto imperfecto entre los pedazos del material.

Para la producción de hierro también se puede utilizar el método de reducción directa el que emplea agentes reactivos reductores como gas natural, coque, aceite combustible, monóxido de carbono, hidrogeno o grafito.

El procedimiento consiste en triturar la mena de hierro y pasarla por un reactor con los agentes reductores, con lo que algunos elementos no convenientes para la fusión del mineral son eliminados. El producto del sistema de reducción directa de hierro puede ser utilizado directamente para la producción de hierro con características controladas.

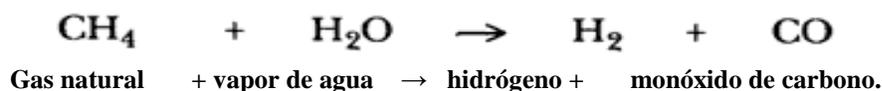
Las reacciones de reducción por Hidrogeno (H_2), son:



En el siglo pasado se propusieron y patentaron muchos métodos para reducir (desoxidar) a los minerales de hierro directamente en el estado sólido. Se sugería el uso de mezclas de gases de hidrógeno, monóxido de carbono o hidrocarburos, por su alto poder desoxidante. Varios de esos métodos eran técnicamente muy razonables pero ninguno de ellos fue capaz de competir económicamente con el alto horno.

En los años cincuenta de este siglo resurgió el interés en muchos países por el desarrollo de tecnologías para producir hierro esponja. El proceso utiliza una mezcla de gases rica en hidrógeno y monóxido de carbono para extraer el oxígeno del mineral de hierro. La mezcla de gases se produce a partir de gas natural y vapor de agua en un dispositivo llamado reformador, que se representa en la figura 10.

El gas natural y el vapor se inyectan a una tubería de acero inoxidable que se calienta con unos quemadores. A altas temperaturas, y con ayuda de catalizadores que se ponen en el interior de los tubos, ocurre la reacción química:



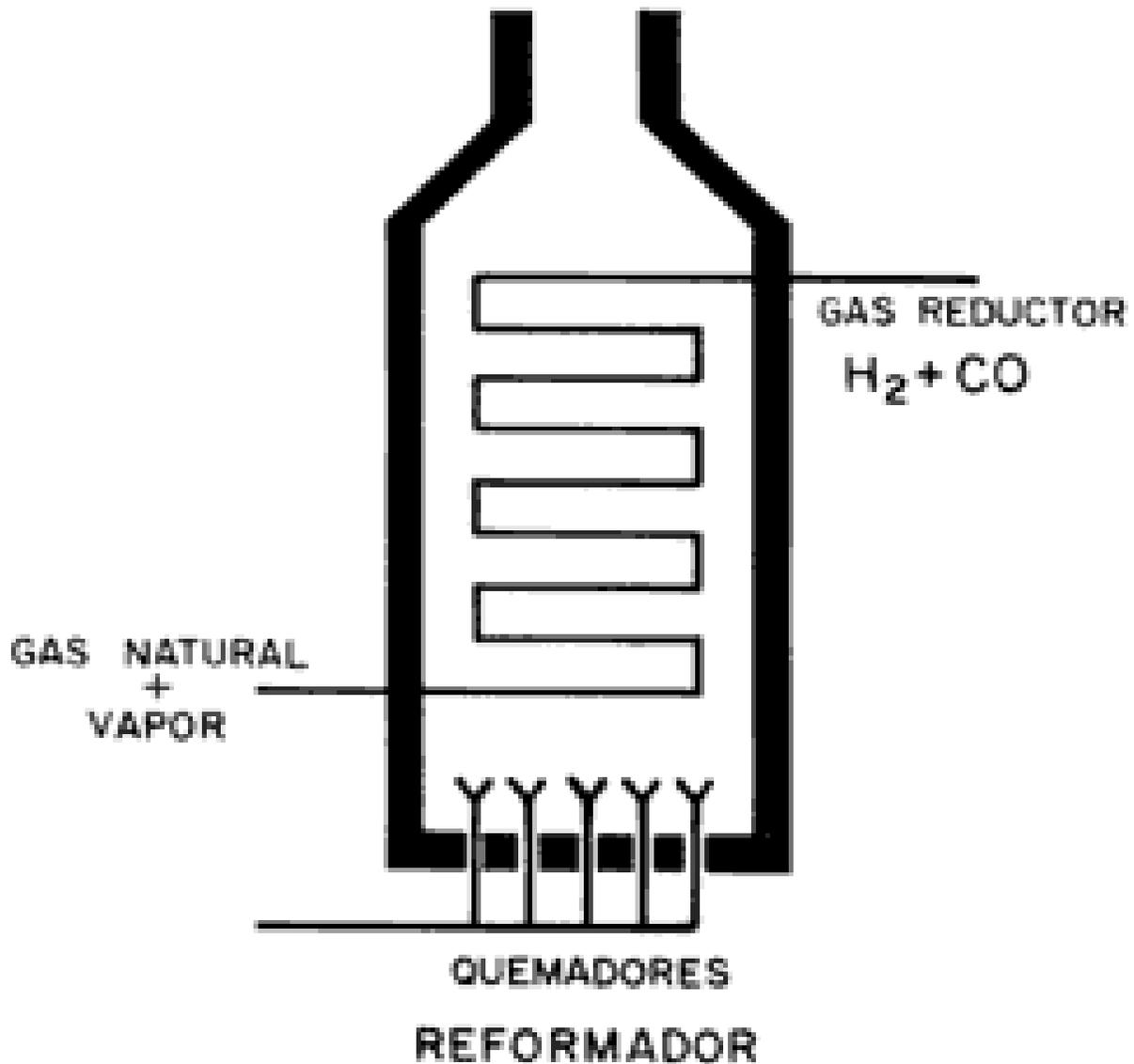


Figura 12. El reformador es un reactor químico que a altas temperaturas convierte una mezcla de gas natural y vapor en un gas de alto poder reductor formado de hidrógeno y monóxido de carbono.

El hidrógeno se forma de la humedad del viento y de los inyectantes en el dardo (raceway). La reducción de los óxidos de hierro con hidrógeno es comparable a la reducción con monóxido de carbono. El hidrógeno es más eficaz para la reducción por encima de los 900 °C. El coeficiente de utilización de hidrógeno medido del gas del tragante es de alrededor del 40%, mientras que el coeficiente de utilización de CO es de alrededor del 50%.

El hidrógeno y el monóxido de carbono, agentes reductores (desoxidantes) sumamente, efectivos, salen del reformador acompañados de pequeñas cantidades de gas natural y bióxido de carbono. La tubería se conecta con los reactores reductores, que no son otra cosa que enormes vasijas metálicas donde se carga el mineral de hierro en forma de pequeñas esferas del tamaño de una canica (a 2 cm, de diámetro), cómo se indica en la figura 10.

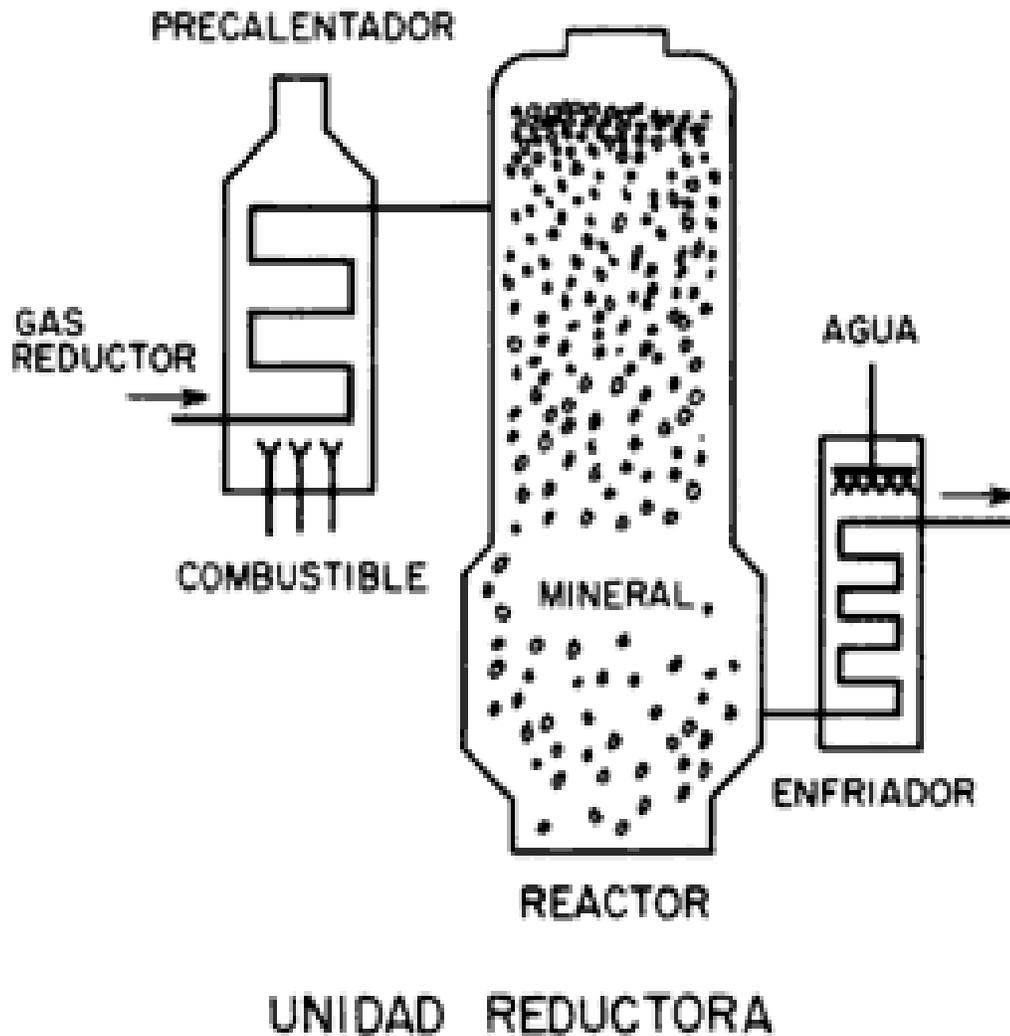


Figura 13. La unidad reductora consta de una enorme vasija donde se deposita un aglomerado de esferas del mineral por donde pasa el gas reductor previamente calentado a altas temperaturas. Posteriormente el gas residual es enfriado en una tubería bañada con agua.

El mineral de hierro que se emplea en las plantas, generalmente tiene la composición del cuadro 1. Alrededor del 30% del mineral es oxígeno asociado con el hierro que debe removerse al reaccionar con el hidrógeno o con el monóxido de carbono. Este objetivo se logra en un 85 o un 90% además de añadir al producto hierro esponja, un 2% de carbono.

La economía de los recursos energéticos consumidos y generados en el proceso es muy importante para obtener precios competitivos. Por esta razón, las plantas se componen de cuatro unidades reductoras para aprovechar al máximo la energía y el potencial de reducción de los gases.

En la figura 11 se ilustra cómo mientras una de las unidades reductoras se está descargando del hierro esponja y cargando de mineral, el flujo de gases reductores está pasando a través de las otras tres unidades. El gas reductor que sale al final todavía se aprovecha para quemarse en el reformador y en otras etapas de proceso.

CUADRO 1.- Composición del mineral de hierro empleado en el proceso

<i>Sustancia</i>	<i>Porcentaje en masa</i>
Hierro	67%
Oxígeno (en el hierro)	67%
Fósforo	0.05%
Azufre	0.02%
Óxido de calcio	1.8%
Óxido de magnesio	0.75%
Óxido de aluminio	1.03%
Óxido de silicio	1.3%
Impurezas	1.1%

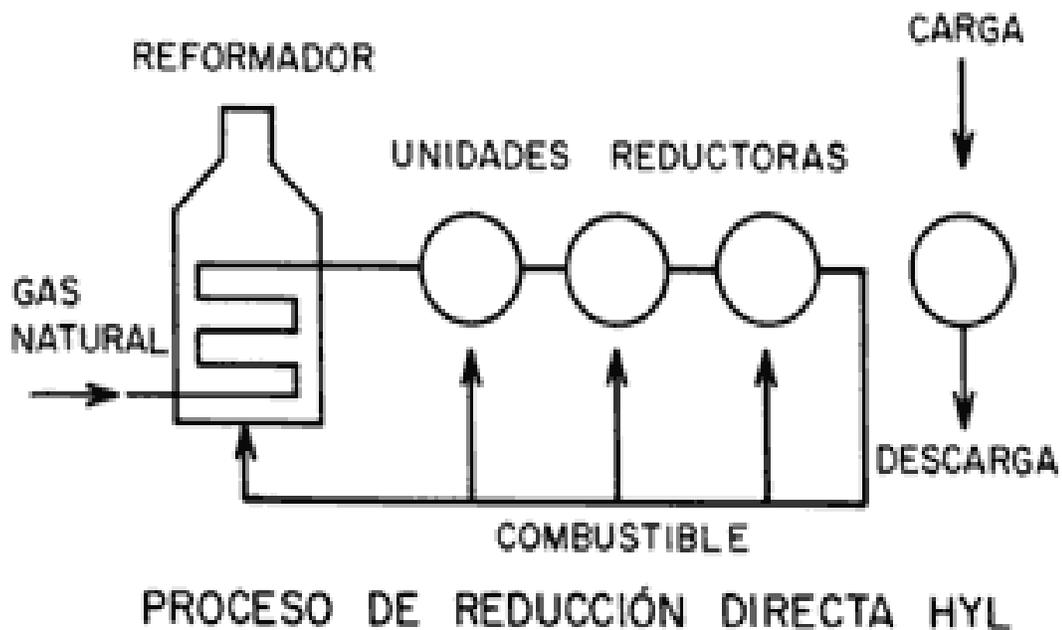


Figura 14. Una planta de reducción directa es un ensamble de un reformador y varias unidades reductoras. Las materias primas y los minerales en el proceso HYL son aprovechados al máximo al emplear el gas reductor residual como combustible para las unidades calefactoras.

De hecho las plantas, en realidad, son una maraña de tubos y válvulas que llevan muchas horas de ingeniería, y cuyo único objetivo es exprimir al máximo los recursos de las materias primas y de los combustibles.

1.2.2. Reacción de Boudouard.

La reacción de Boudouard es la reacción redox de una mezcla de equilibrio químico de monóxido de carbono y dióxido de carbono a una temperatura dada. Es la desproporción del monóxido de carbono en dióxido de carbono y grafito o su reverso:



Mientras que la entalpía de formación de CO₂ es mayor que la de CO, la entropía de formación es mucho menor.

En consecuencia, según el diagrama de Ellingham, el cambio total de energía libre de formación de CO₂ por oxidación del carbono es casi constante e indiferente de la temperatura, mientras que el cambio de energía libre de formación de CO es una línea decreciente.

Estas dos líneas se encuentran a 700 ° C, por lo que la reacción de Boudouard implica que a temperaturas más bajas el equilibrio está en el lado exotérmico del dióxido de carbono y en temperaturas más altas la formación endotérmica de monóxido de carbono es la reacción dominante.

Por ejemplo, en el entorno que reduce la temperatura de una chimenea, el monóxido de carbono es el producto estable. Cuando el monóxido de carbono alcanza la parte superior de la chimenea, y el aire más fresco, la reacción de Boudouard ocurre;

El monóxido de carbono se oxida en dióxido de carbono, y el grafito precipita (reduce) como hollín. El diagrama de Ellingham es un diagrama del cambio de energía libre de Gibbs para una reacción (ΔG), en comparación con la temperatura.

Curva de Boudouard

La curva de Boudouard señala las proporciones teóricas de CO y CO₂ que pueden existir en equilibrio a la presión atmosférica y a diferentes temperaturas, en un recinto, cuando se encuentran mezclados esos dos gases en presencia de un exceso de carbono (1).

Así, por ejemplo, según la curva de Boudouard, a 500 C, el equilibrio corresponde aproximadamente a: CO 5% y CO₂ 95 %; a 800 C hay equilibrio con CO 85 % y CO₂ 15 %.

En términos generales puede decirse, que a temperaturas inferiores a 400 °C son estables grandes porcentajes de CO₂, los que son inestables a altas temperaturas.

En cambio, importantes porcentajes de CO son estables a temperaturas superiores a 900 °C, e inestables a bajas temperaturas (2).

Si en un momento y a una temperatura determinada hay un exceso de CO₂ sobre el porcentaje teórico, marcado por la curva de Boudouard, el equilibrio se alcanza al reaccionar el CO₂ con el carbono. Si el exceso es de CO, el equilibrio se alcanzará al descomponerse el CO₂ de acuerdo con la siguiente reacción:



Esta reacción se acelera en presencia de algunas partículas de hierro.

Un caso especial de agresividad química, a 400 - 500 ° C, lo Constituye el monóxido de carbono contenido en la atmósfera que se encuentra en contacto con el material refractario. La deposición de carbono en los poros abiertos del material

Refractario según la reacción:



Que se encuentra catalizada (acelerada) por la presencia de Carburo de Hierro, el cual se forma en atmósfera reductora a partir de partículas de Fe₂O₃ presentes como impurezas en las materias primas refractarias, a temperaturas comprendidas Entre los 400 ° C y 700 ° C.

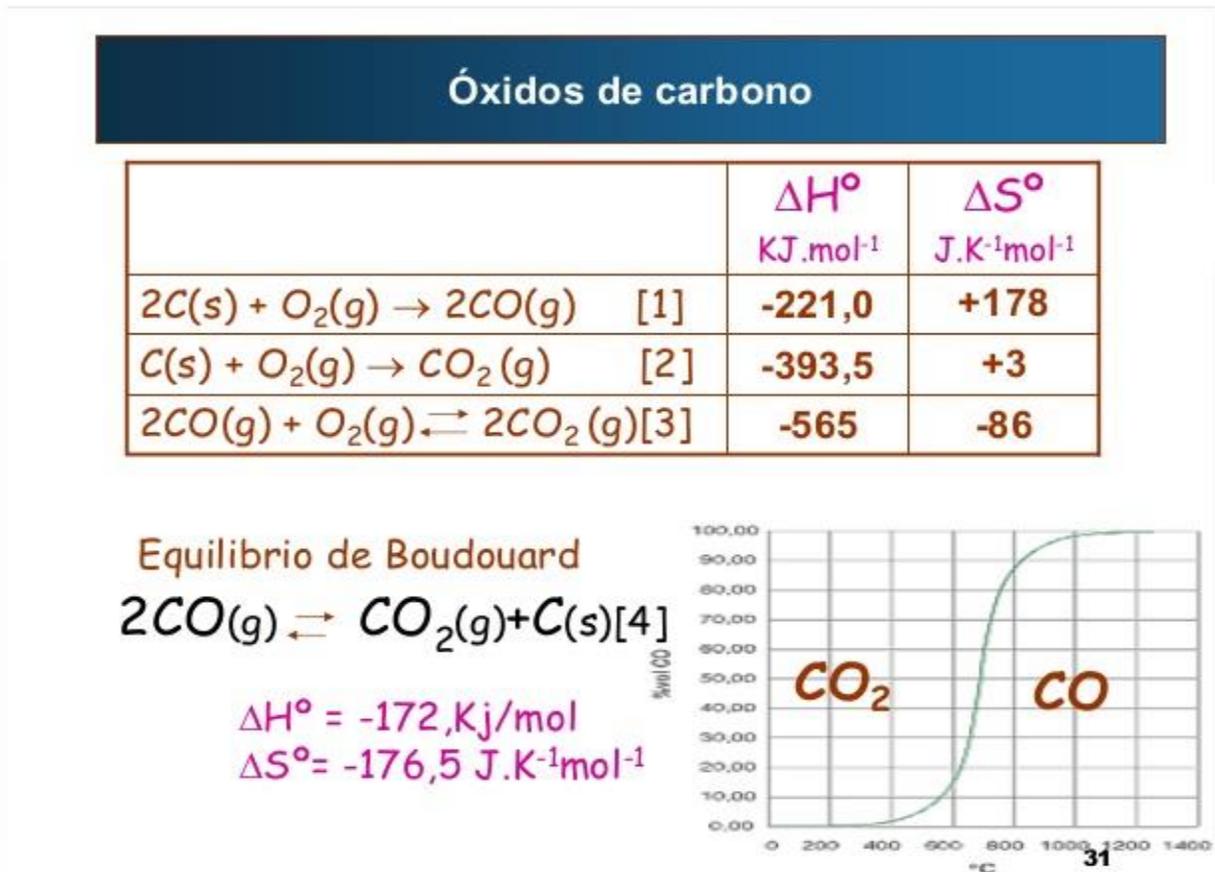


Figura 15. Reacción de Boudouard.

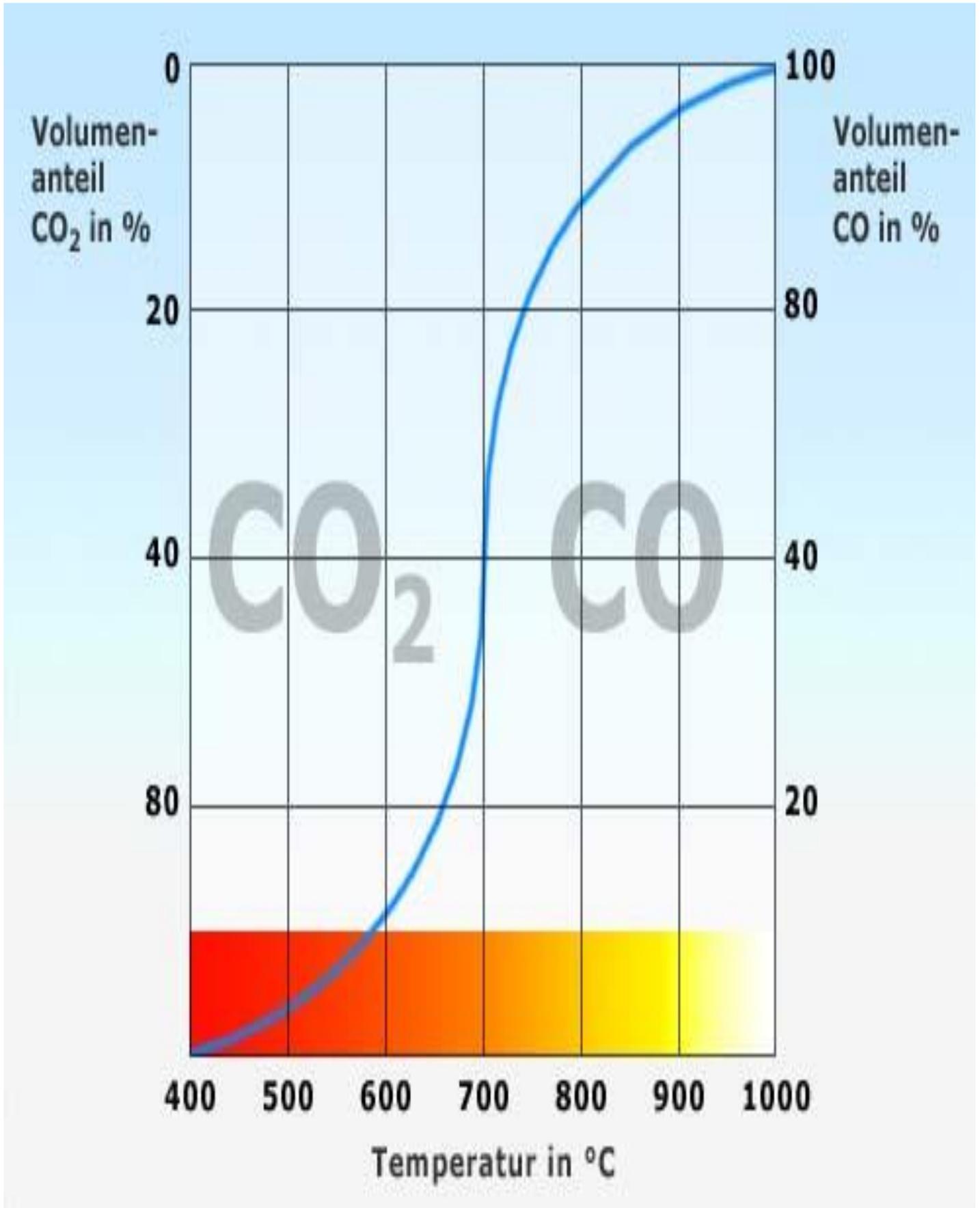


Figura 16. Curva de Boudouard.

Curvas de Chaudron y Boudouard.

Las curvas de Chaudron y Boudouard señalan las posibles reacciones teóricas que se pueden producir a diversas temperaturas entre los óxidos de hierro Fe_2O_3 , Fe_3O_4 y FeO con diferentes proporciones de CO y CO_2 . Es decir, estas curvas señalan las proporciones de CO que se deben rebasar para que se pueda producir a diversas temperaturas la reducción de los diferentes óxidos de hierro /2/.

A temperaturas superiores a $555\text{ }^\circ\text{C}$, la reducción de los óxidos de hierro por la acción de mezclas de CO y de CO_2 se realiza en tres etapas sucesivas, avanzando las transformaciones en la siguiente forma:



A temperaturas inferiores a $555\text{ }^\circ\text{C}$, el paso de Fe_2O_3 a Fe se verifica solamente a través del Fe_3O_4 , sin la aparición de la fase FeO intermedia. Es interesante indicar que el óxido de hierro FeO , denominado *wustita*, no es estable a la temperatura ambiente, y normalmente no se encuentra libre en forma estable en la naturaleza, donde aparece en forma combinada, y sólo en algunas ocasiones se presenta, pero en forma inestable. El FeO solamente es estable a temperaturas superiores a $560\text{ }^\circ\text{C}$. /3/.

Teóricamente, las transformaciones $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$ y $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ por la acción del CO , sólo pueden producirse a temperaturas superiores a $555\text{ }^\circ\text{C}$.

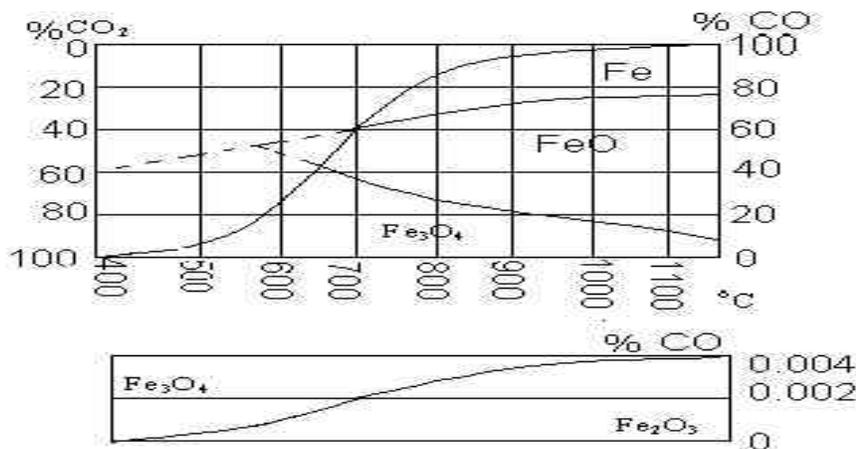
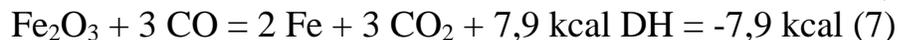
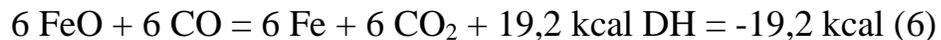
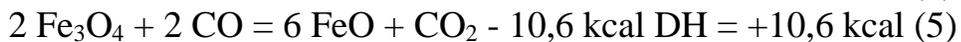
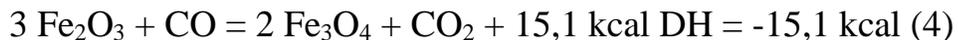


Figura 17. Curvas de Chaudron y Boudouard

1.3. El alto horno.

Aunque existen otros métodos, el método más empleado para su obtención es por reducción química de los óxidos de hierro en un alto horno (su nombre correcto es horno alto), debido a su bajo costo, alta productividad y alto rendimiento térmico.

Un alto horno es un horno especial recubierto de material refractario (capaz de soportar altas temperaturas) en el que tienen lugar la fusión de los minerales de hierro y la transformación química de éstos en el llamado fundición de primera fusión o, en la terminología siderúrgica, arrabio, con un contenido en carbono del 2.6-4.3% en carbono.

Un alto horno es una planta química en forma de columna de una altura entorno los 20-30 m, en el que el diámetro aumenta desde su parte superior (tragante) hasta alcanzar el máximo (vientre) conformando la cuba. Desde el vientre su diámetro disminuye en la zona llamada etalaje hasta hacerse cilíndrico en la obra, cuya parte inferior se llama crisol.

El crisol dispone de dos orificios de salida, uno (bigotera) por encima del otro (piquera) para la evacuación de la escoria y el arrabio, respectivamente. Los gases calientes que salen por la parte superior del horno, contienen dióxido y monóxido de carbono y óxidos de azufre que arden con facilidad, por lo que se queman en otros hornos especiales (estufas Cowper) para calentar el aire que se introduce en el alto horno a través de una serie de conducciones (toberas) por encima de la bigotera.

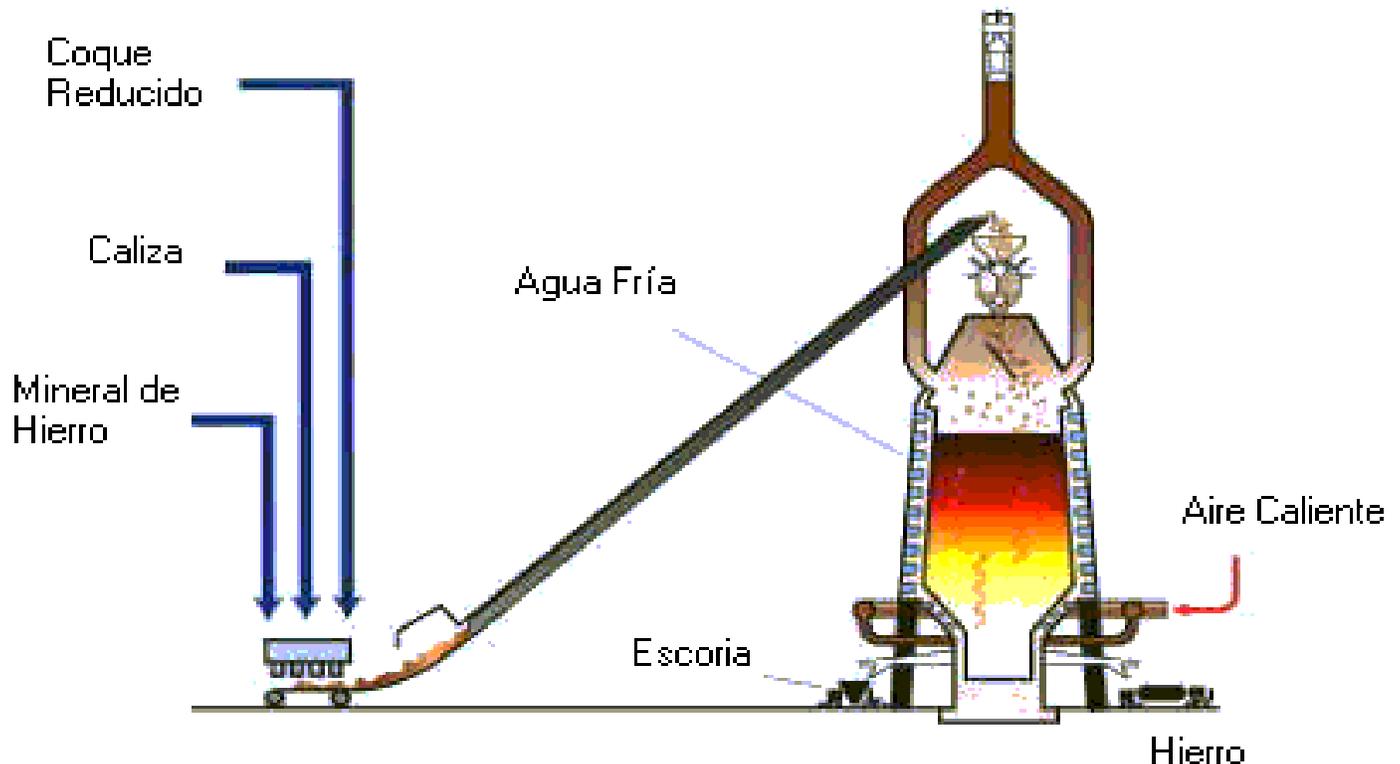


Figura 18. Esquema del funcionamiento elemental del Alto Horno.

1.3.1. Instalación.

El alto horno es la instalación industrial para la obtención de hierro en forma de arrabio a partir de los minerales de hierro. Esta obtención de hierro se realiza por reducción química de dichos minerales de hierro.

Un alto horno típico está formado por una cápsula cilíndrica de acero de unos 30 m de alto forrados con un material no metálico y resistente al calor, como asbesto o ladrillos refractarios.

El diámetro de la cápsula disminuye hacia arriba y hacia abajo, y es máximo en un punto situado aproximadamente a una cuarta parte de su altura total denominada vientre. La parte inferior del horno está dotada de varias aberturas tubulares llamadas toberas, por donde se fuerza el paso del aire que enciende el coque.

Cerca del fondo se encuentra un orificio por el que fluye el arrabio cuando se sangra el alto horno que recibe el nombre de piquera. Encima de ese orificio, pero debajo de las toberas, hay otro agujero para retirar la escoria denominado bigotera.

La parte superior del horno contiene respiraderos para los gases de escape y un par de tolvas redondas, cerradas por válvulas en forma de campana, por las que se introduce el mineral de hierro, el coque y la caliza.

Una vez obtenido el arrabio líquido, éste se purifica en los hornos de afinado para obtener acero que se puede introducir en distintos tipos de coladura para obtener unos materiales determinados: la colada convencional, de la que se obtienen productos acabados; la colada continua, de la que se obtienen trenes de laminación y, finalmente, la colada sobre lingoteras, de la que lógicamente se obtienen lingotes.

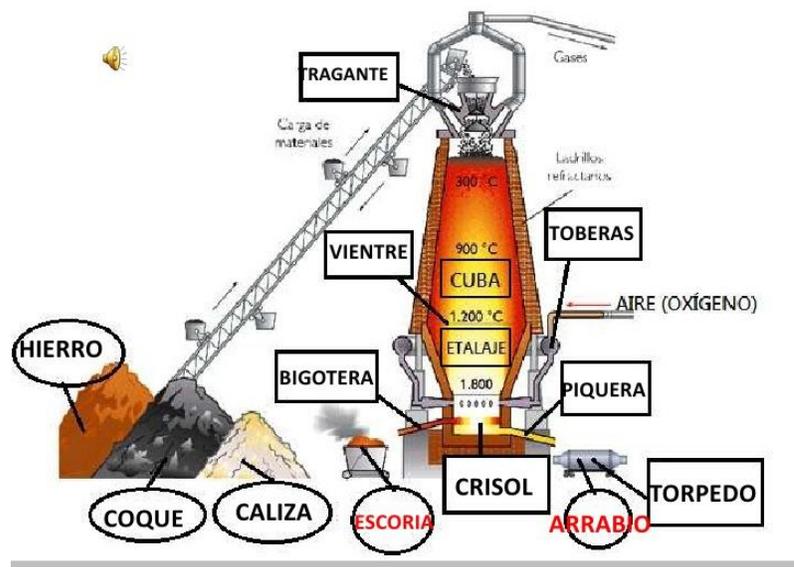


Figura 19. Instalación y partes básicas del Alto Horno.

Básicamente consta de las siguientes partes:

- ☆ La cuba: de forma troncocónica, constituye la parte superior del alto horno; por la zona más alta y estrecha, denominada boca, se introduce la carga compuesta por:
 - El mineral de hierro, que puede ser de diferentes composiciones: hematites y limonita (óxido férrico), magnetita (óxido ferroso férrico) y siderita (carbonato).
 - El combustible, que generalmente es coque, producto obtenido de la destilación del carbón de hulla de gran poder calorífico y pobre en cenizas.
- ☆ El fundente, que puede ser roca calcárea o arcilla, según la ganga presente en el mineral sea ácida o básica, respectivamente. El fundente se combina químicamente con la ganga para formar la escoria, que queda flotando sobre el arrabio líquido y, entonces se puede separar fácilmente por decantación. La carga va descendiendo poco a poco y su temperatura y volumen aumentan a medida que baja. Este aumento de volumen exige que la cuba se ensanche hasta llegar al vientre, zona donde se produce la unión con el etalaje y donde el diámetro de la instalación es mayor.
- ☆ El etalaje, también de forma troncocónica. En esta parte del horno se produce una notable disminución del volumen de los materiales, como consecuencia de las transformaciones químicas que tienen lugar en él. La zona inferior es de menor diámetro, a causa de esta disminución de volumen y, también, por el hecho de que la fusión de la carga hace que ésta fluya sin dejar espacios libres.
- ☆ El crisol, es un cilindro de gran capacidad, que recoge la fundición líquida, así como la escoria, que queda flotando en estado líquido. En la zona de unión del etalaje y el crisol, se insertan las toberas, que son unos tubos mediante los cuales se inyecta una corriente de aire comprimido y previamente calentado en el crisol.
- ☆ El sistema de carga, se realiza con la ayuda de vagones que ascienden a la boca del horno con la mezcla adecuada de mineral de hierro y combustible, desde un depósito donde se realiza la dosificación, mezclado y aditivado de la materia prima.
- ☆ El sistema de descarga, se identifican para este efecto dos productos: la escoria (formada por sílice, SiO_2 , y óxido de calcio, CaO , también puede haber alúmina, óxido ferroso, ...) y el arrabio (producto de hierro fundido obtenido en el alto horno caracterizado por su gran cantidad de impurezas, como puede ser el carbono) los dos son retirados por la base del horno mediante vagones ubicados de manera contrapuesta. Esta disposición obedece a necesidades de manipulación, la escoria se puede someter a un proceso de recuperación secundaria (no usual), o utilizarla para otros productos como puede ser la elaboración de elementos abrasivos.

2. PARTES DEL ALTO HORNO

1. **CRISOL.** Esta parte sirve como depósito de los materiales fundidos, el arrabio y la escoria; tienen una forma cilíndrica.
2. **ETALAJE.** Esta parte ubicada encima del crisol; de forma cónica troncada.
3. **VIENTRE.** Esta parte forma la zona entre los etalajes y la cuba.
4. **CUBA.** Forma cónica truncada es la unidad más alta del horno.
5. **TRAGANTE.** Extremo superior del alto horno donde se carga la carga

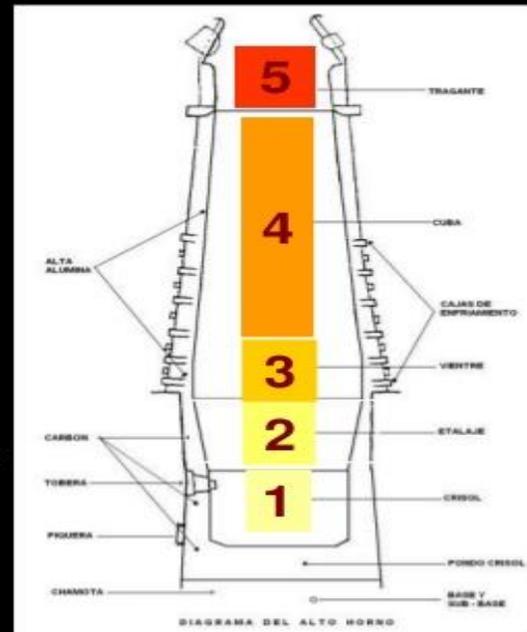


Figura 20. Descripción de las partes básicas del Alto Horno.

A continuación se describe un ejemplo de un alto horno moderno, bien instrumentado:

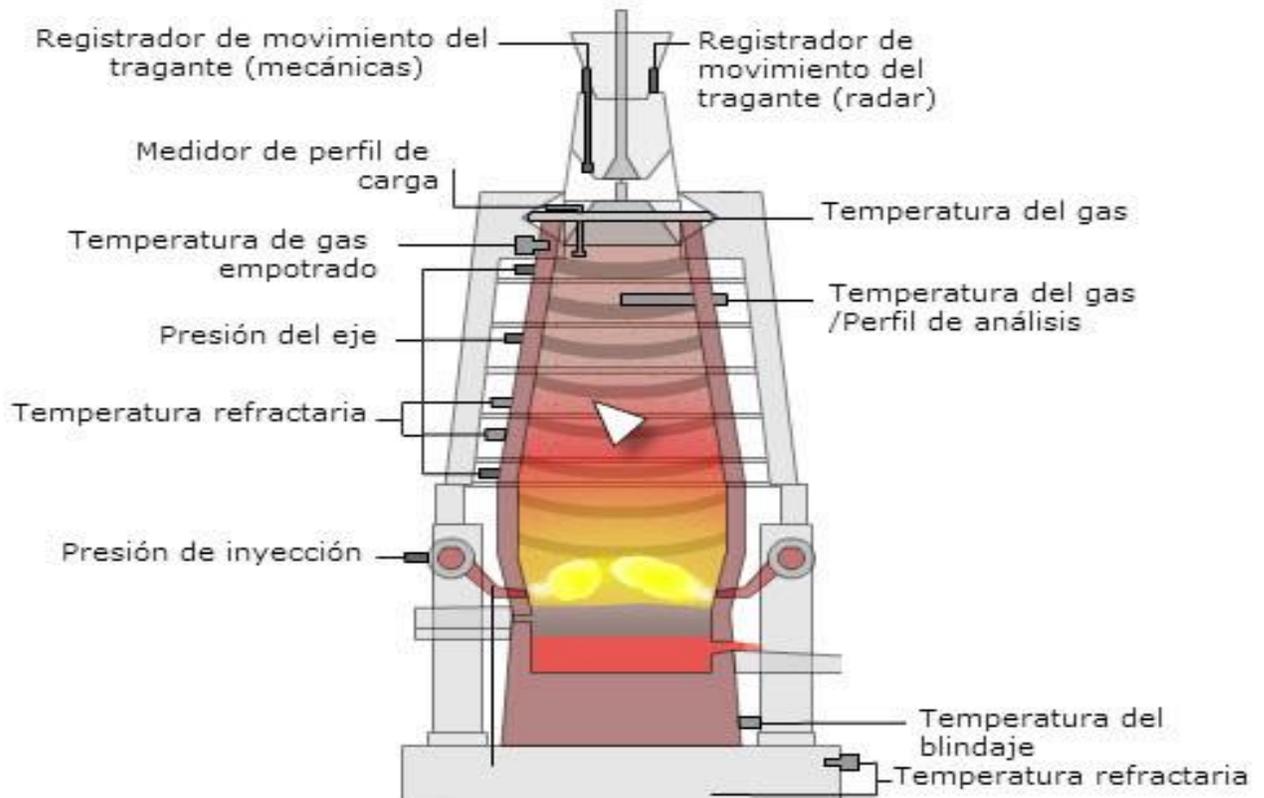


Figura 21. Descripción de las partes instrumentales del Alto Horno.

1.3.1. Equipo auxiliares.

El diseño de los sistemas auxiliares del proceso suele ser la última fase del diseño del mismo y es crítico para el éxito comercial de dicho proceso. A la hora de diseñar los sistemas auxiliares hay que tener en cuenta las condiciones de la planta industrial.

En el caso del alto horno es conveniente y necesario que se apoye en equipos auxiliares que fortalezcan el equipo principal y fomenten el buen funcionamiento del horno en condiciones de recuperación de calor, inyección de aire, enfriamiento, etc. Además de la estructura principal del alto horno, existen los siguientes equipos auxiliares:

- ✓ Cintas transportadoras para transportar las materias primas (mineral y coque) al tragante del alto horno.
- ✓ Tolvas para almacenar temporalmente estas materias primas.
- ✓ ICP (inyección de carbón pulverizado) con equipo para pulverizar el carbón e inyectarlo bajo presión.
- ✓ Carga de campana, las materias primas entran en el horno a través del espacio creado al bajar una pequeña campana invertida. Esta campana se cierra y una campana más grande (ancha por abajo) se abre para permitir que las materias primas caigan en la cuba que se encuentra abajo.
- ✓ Carga sin campana, las materias primas se cargan en el horno a través de una rampa giratoria.
- ✓ Máquinas soplantes o compresores se las emplea para alimentar de aire al A. H, son accionados por motores a gas producidos por el A. H. En instalaciones experimentales también se ha demostrado que la producción se incrementa enriqueciendo el aire con oxígeno.
- ✓ La estufa Cowper para calentar el aire. Es un horno cilíndrico de alrededor 12 m de diámetro y unos 55 m de altura y tiene una cámara llena de ladrillos cuadrículados de sílice.

La estufa Cowper es un tipo de intercambiador de calor en el cual el calor producido por la combustión del gas de alto horno se almacena en la cámara de recuperación del calor, después de lo cual se sopla aire frío a través del recuperador de calor para producir el aire caliente precalentado para el horno.

Dos o más estufas funcionan en ciclos alternos, proporcionando una fuente continua de aire caliente al horno.

- ✓ Turbina de recuperación de la presión del tragante del alto horno: Por lo general un alto horno funciona con una presión del tragante de alrededor de 250 kPa.

Para recuperar la energía del gran volumen de los gases de escape de alta presión, el alto horno está equipado, después de la eliminación del polvo, con una turbina de recuperación de la presión del tragante para generar energía eléctrica usando la diferencia de presión entre el tragante del horno y el gasómetro de almacenamiento de gas.

- ✓ Recuperadores de polvo son equipos para la eliminación del polvo y recuperación de partículas que impiden la buena combustión o reacciones dentro del alto horno.
- ✓ Recuperadores de calor: Es la principal instalación auxiliar, se los emplea para calentar el aire a insuflar en el A .H, a una temperatura que oscila entre los 800 y 1.000 °C, con el propósito de mejorar la eficiencia de la combustión. Se utilizan como mínimo 3 torres o estufas. Son aparatos contruidos con ladrillos refractarios huecos.

Consideraciones de la inyección del viento:

Para el funcionamiento del alto horno es necesaria una corriente de gases cuya misión es:

- ❖ Aportar el oxígeno necesario a la combustión del coque.
- ❖ Transportar el gas, que en contacto con la carga, producirá las reacciones de reducción de los óxidos.
- ❖ Ceder su calor a las cargas sólidas elevando su temperatura para propiciar estas reacciones.

La creación de esta corriente crea varios problemas:

- ❖ El viento debe introducirse en el horno a una presión suficiente para que atravesase en pocos segundos (de 3 a 8) todo el horno. Esto se consigue mediante soplantes, cuya función es impulsar un gran caudal de aires (de 2500 m³ a mas de 4000 m³ por minuto) a la presión adecuada (entre 1,5 y 4 kg/cm²).
- ❖ Si esta masa se introduce a temperatura ambiente, una gran cantidad del calor producido por la combustión del coque se perdería en calentar el aire, por ello, para evitar esta pérdida, el aire se debe insuflar a la mayor temperatura posible que, según las instalaciones puede variar entre los 900° c y 1100°C y en algunos se alcanzan los 1300°C.

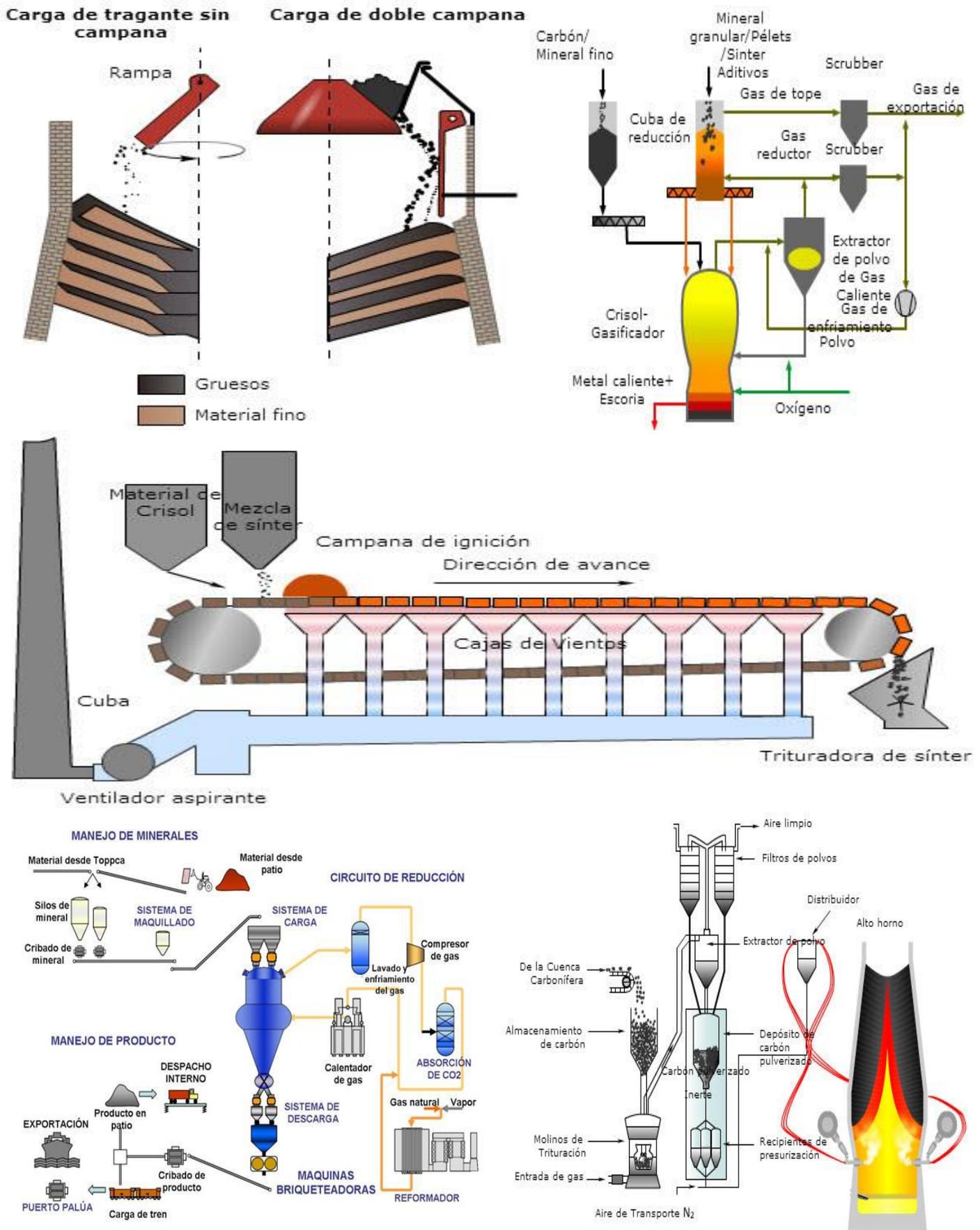


Figura 22. Ejemplos de equipos auxiliares del Alto Horno.

Gas de Alto Horno y Estufas para Pre calentamiento de Aire

El aire insuflado en el alto horno es precalentado a 1000–1250 °C en las estufas Cowper. Las estufas trabajan en ciclos, primero se calientan los ladrillos refractarios en la estufa mediante quemadores usando gas de alto horno. Luego se insufla el aire frío y el calor almacenado en los ladrillos se transfiere al gas. El aire caliente se envía al alto horno a través de la tubería principal de aire caliente, la morcilla y las toberas.

En la parte superior del horno, el gas del tragante es caliente y contiene una gran cantidad de partículas finas. Para removerlas, el gas es enviado a un colector de polvo y a un sistema de limpieza por vía húmeda a través del tubo de bajada del gas del tragante.

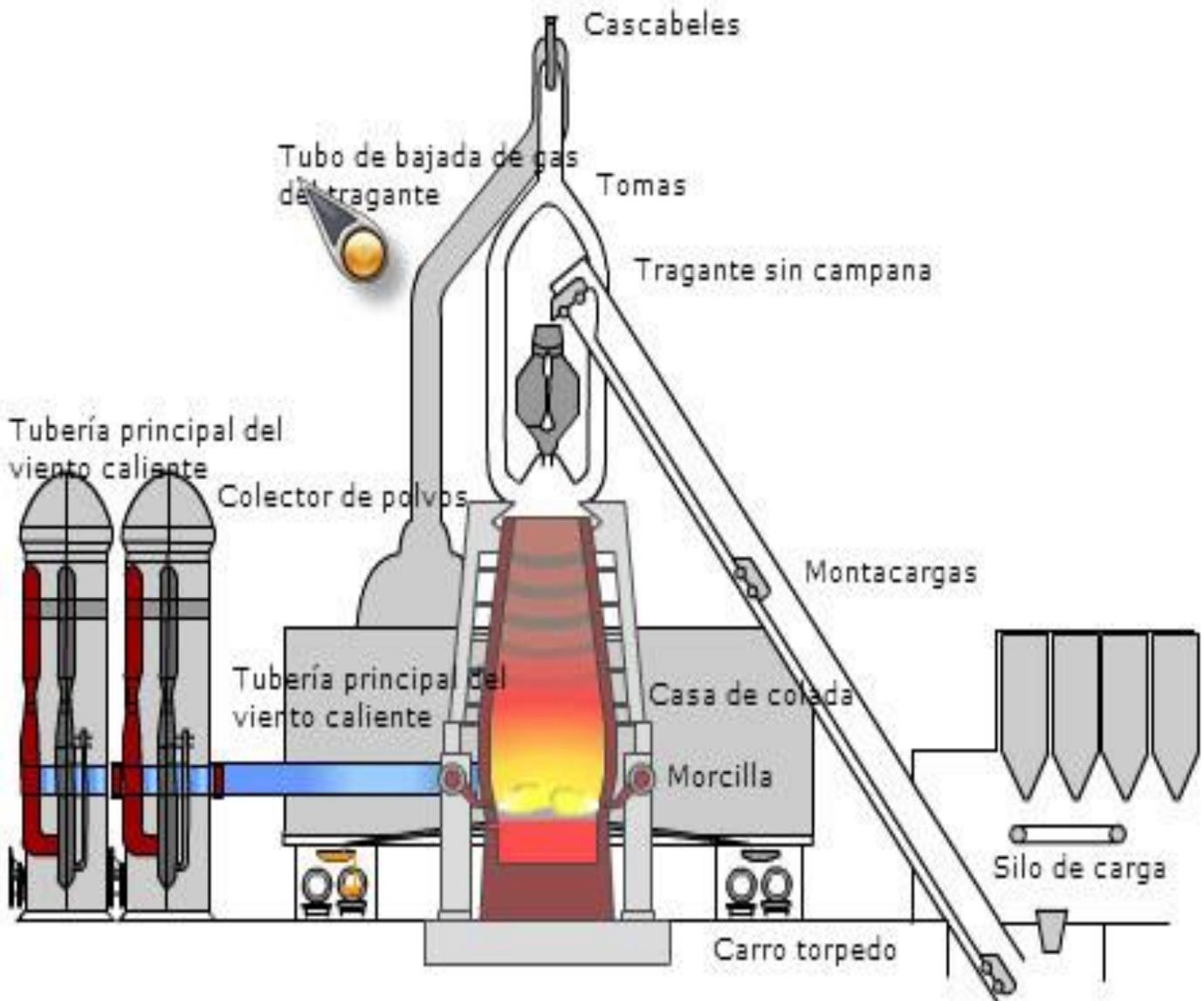


Figura 23. Ejemplos de equipos auxiliares del Alto Horno.

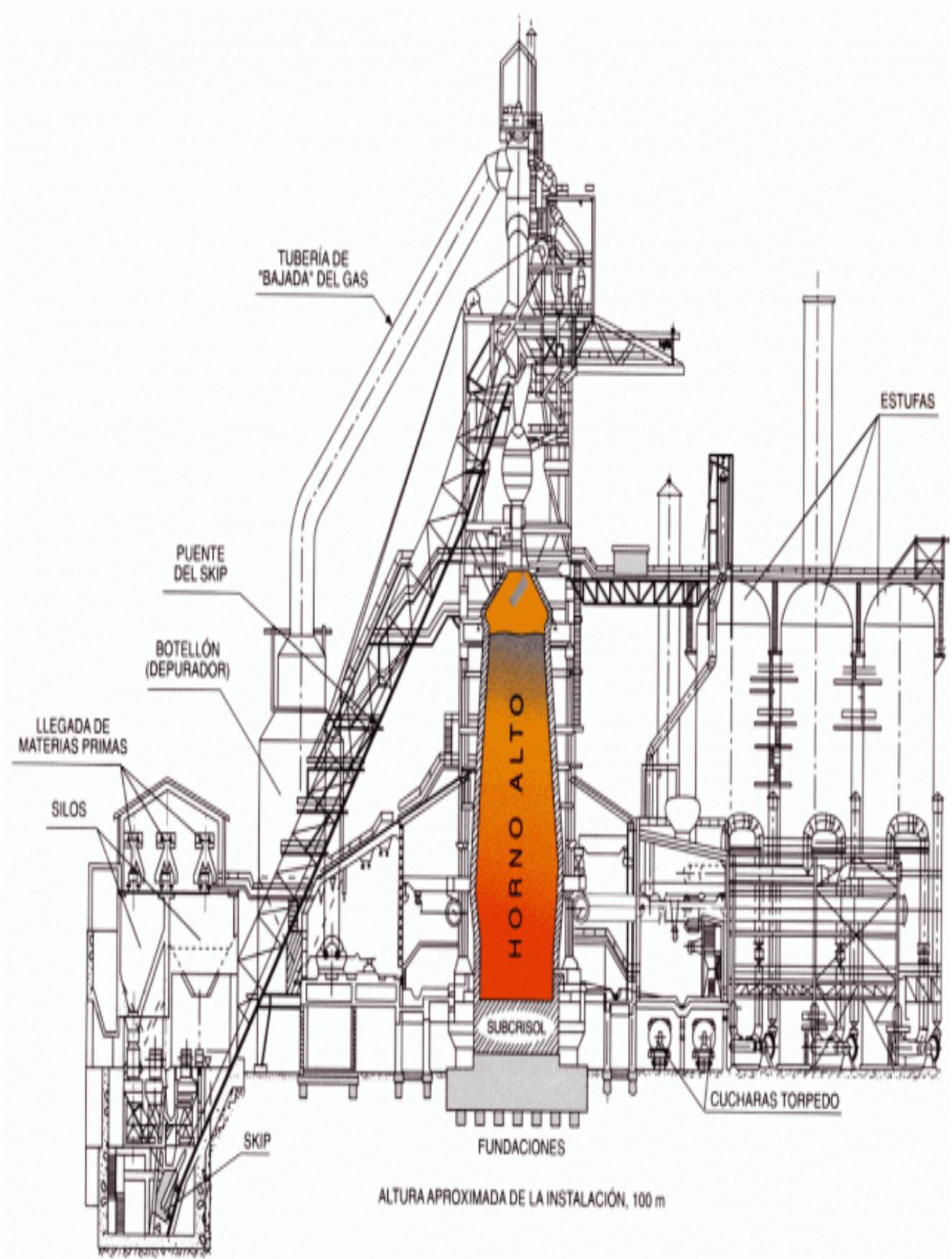


Figura 24. Esquema de los equipos auxiliares del Alto Horno.

1.3.2. Operación del Proceso.

- ☆ El alto horno consiste en una especie de depósito troncocónico y tienen un diámetro mayor a 8 m y llegan a tener una altura superior de los 60 m.
- ☆ Están revestidos de refractario de alta calidad en el cual se cargan desde arriba capas alternadas de mineral de hierro carbón y fundente.
- ☆ Un fuerte calentamiento del carbón de las capas inferiores (obteniendo mediante corrientes de aire caliente) provoca una absorción del oxígeno del mineral de hierro por parte del carbono.
- ☆ Los altos hornos pueden producir entre 800 y 1600 toneladas de arrabio cada 24 h. La caliza, el coque y el mineral de hierro se introducen por la parte superior del horno por medio de vagones que son volteados en una tolva.
- ☆ Para producir 1000 toneladas de arrabio, se necesitan 2000 toneladas de mineral de hierro, 800 toneladas de coque, 500 toneladas de piedra caliza y 4000 toneladas de aire caliente.
- ☆ Con la inyección de aire caliente a 550°C , se reduce el consumo de coque en un 70%. Los sangrados del horno se hacen cada 5 o 6 horas, y por cada tonelada de hierro se produce $1/2$ de escoria.
- ☆ La alta temperatura así obtenida da lugar a la fusión del hierro, que es recogido, mezclado con grandes cantidades de carbono (arrabio), por un orificio situado en la parte baja del horno.
- ☆ El aire se insufla por medio de una decena de toberas de bronce situadas radialmente en la parte baja del horno y alimentadas por una batería de sopletes accionados por motores de explosión. La escoria, más ligera que el arrabio, se recoge encima de este y sale por orificios practicados en las paredes del crisol.
- ☆ Cada 3 horas, aproximadamente, se extrae el arrabio por unos orificios situados debajo de los anteriores. El aire insuflado en el horno se precalienta haciéndolo pasar por recuperadores Cowper, los cuales están constituidos por cilindros verticales de plancha de 7 mm de diámetro y más de 30 metros de altura llenos de material refractario.
- ☆ Existen 4 Cowper al servicio de cada horno alto; dos de ellos están atravesados por gases muy calientes, obtenidos de la combustión y que proviene de la boca del propio horno, hasta que el instante que el material refractario alcanza una temperatura muy elevada;

- ☆ Un tercero, que ya se halla caliente, cede el calor almacenado al aire que los sopletes envían al alto horno; el cuarto es de reserva. La fase de calentamiento dura de una a dos horas.
- ☆ En el horno alto tienen lugar fenómenos fisicoquímicos complicados, que no han sido aún aclarados en todos sus detalles. El coque no posee tan sólo la misión de quemar los materiales cargados y ponerlos a elevada temperatura, sino que el óxido de carbono CO, producido por su combustión, reacciona con el óxido de hierro transformándose en anhídrido carbónico, CO₂, y liberando el hierro.
- ☆ La temperatura, que en la boca del horno tan sólo es de 200°C, aumenta cuando se desciende y alcanza los 1 200°C en el vientre y los 1800°C en el crisol. La reacción entre el CO y el mineral tiene lugar a 400°C. A 900°C se inicia la fusión del mineral y el carbono comienza a disolverse en el hierro, hasta que su proporción alcanza el 3,5 o 4% en la parte inferior del horno.
- ☆ En esta parte se completa la reducción del óxido de hierro en contacto con el coque incandescente, y la ganga reacciona con el fundente para formar la escoria, la cual, al trotar sobre el arrabio, lo protege de la acción oxidante del aire insuflado a poca distancia por encima del baño.
- ☆ En el funcionamiento de un alto horno tienen lugar dos flujos continuos a contracorriente: de arriba hacia abajo desciende el mineral de hierro, coque, fundentes, y de abajo hacia arriba se mueven los productos de combustión del coque y el aire caliente. Al descender, el coque se calienta por los gases calientes que ascienden, y al ponerse en contacto con el aire de la parte inferior del horno se quema.
- ☆ La mezcla gaseosa calentada compuesta de CO, CO₂ y el nitrógeno del aire sube, y entrando en contacto con los materiales de carga que descienden los calienta ininterrumpidamente creando en diferentes partes del horno las zonas de temperatura correspondientes.
- ☆ En el hierro se disuelven las combinaciones sulfúricas del mineral y el coque. La disolución del carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre en el hierro se llama hierro fundido. Las escorias, lo mismo que el hierro fundido caen en forma de gotas en la parte inferior del alto horno. Pero, las escorias tiene un peso específico menor en comparación con el hierro fundido, y, por eso, suben en estado líquido a la superficie del hierro fundido líquido.
- ☆ El hierro fundido sale del alto horno a través de la piqueta y las escorias, por la bigotera. Los productos de los altos hornos son: el hierro fundido, las escorias y el gas.

- ☆ El hierro fundido es producto fundamental de la fusión en el alto horno. Con relación a su composición química y su destino el hierro fundido se divide en fundición gris, arrabio y fundición especial; y según la clase de combustible empleado, en hierro de coque y de carbón vegetal.
- ☆ Los altos hornos funcionan de forma continua. La materia prima que se va a introducir en el horno se divide en un determinado número de pequeñas cargas que se introducen a intervalos de entre 10 y 15 minutos.
- ☆ La escoria que flota sobre el metal fundido se retira una vez cada dos horas, y el arrabio se sangra cinco veces al día.
- ☆ La producción de arrabio de un horno es de unas 1.500 a 3.000 Tn/día. Su trabajo es ininterrumpido ya que de pararse, el refractario sufre graves daños y se tendría que cambiar. Normalmente funciona durante 10 años.
- ☆ El arrabio es el producto del alto horno que se utiliza para la obtención de acero. Los hierros fundidos con alto contenido en silicio o manganeso se llaman ferroaleaciones. Estas se utilizan como adiciones especiales para producir acero y piezas de hierro fundido.
- ☆ Las escorias de los altos hornos se utilizan en la producción de ladrillos, bloques y hormigón. El gas del alto horno (de tragante) limpio de polvo se usa como combustible en los recuperadores, en las calderas de vapor y otras instalaciones de producción.
- ☆ Un horno alto funciona ininterrumpidamente, día y noche, hasta que, al cabo de un tiempo, que oscila entre 7 y 15 años, debe retirarse del servicio para reconstruir las instalaciones corroídas.
- ☆ El arrabio que sale por la boca de colada del horno alto (arrabio de primera fusión) se recoge en un gran recipiente (caldero de colada), que es de acero y se halla revestido interiormente de refractario, el cual lo aísla térmicamente y permite su transporte hasta la acerería, en la que será transformado en acero.
- ☆ Si su empleo no ha de ser inmediato, el arrabio se cuele en moldes rectangulares formados en un lecho de arena con una longitud aproximada de 1 m. Los lingotes solidificados en dichos moldes se separan a golpes de maza, se elevan mediante una grúa y se cargan en vagones para ser expedidos a los consumidores.

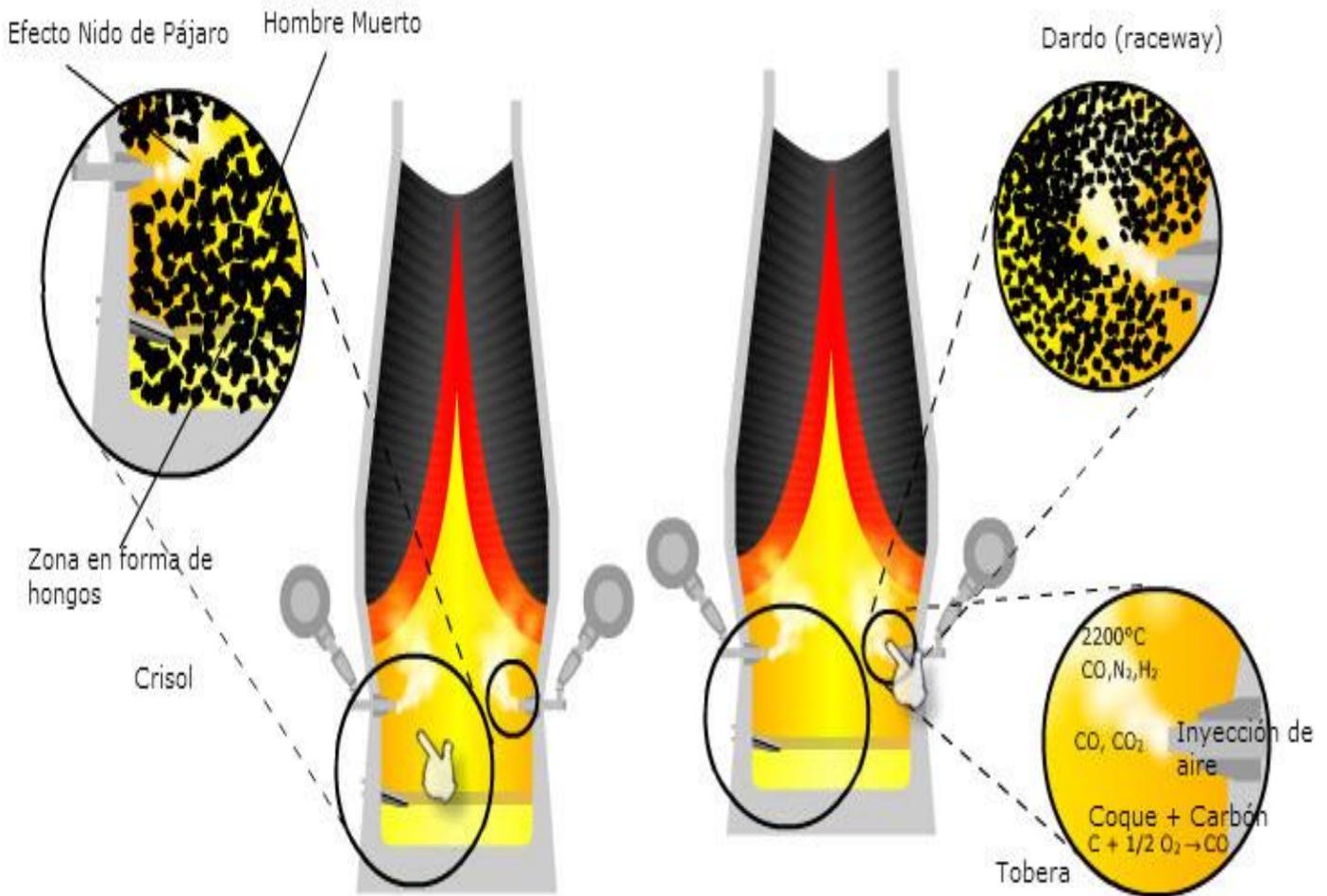


Figura 25. Imágenes que ilustran dónde se encuentran las toberas, el dardo (raceway) y el hombre muerto en el alto horno, y una vista detallada de estas áreas especiales..

☆ Toberas, Dardos (raceway), Crisoles y Hombre Muerto.

El aire caliente se inyecta en el horno a través de las toberas, que son alimentadas desde la morcilla que rodea al alto horno. Una tobera es un tubo cónico de cobre, y la cantidad de toberas oscila de 12 en un alto horno pequeño hasta 42 en un alto horno grande. El viento caliente gasifica los coques en frente de las toberas así como también el reductor auxiliar inyectado por la tobera, creando una cavidad denominada dardo o raceway. El oxígeno en el viento se convierte a monóxido de carbono gaseoso, el gas resultante tiene una temperatura de llama de 2100–2300 °C.

El crisol es la zona inferior del alto horno donde se acumula el material fundido. Contiene una capa de escoria que flota sobre la capa de arrabio. La carga de coque puede descansar en el fondo del horno o puede flotar en la capa de arrabio. Una zona de coques casi estancados está presente en el centro del crisol del horno, denominada hombre muerto.

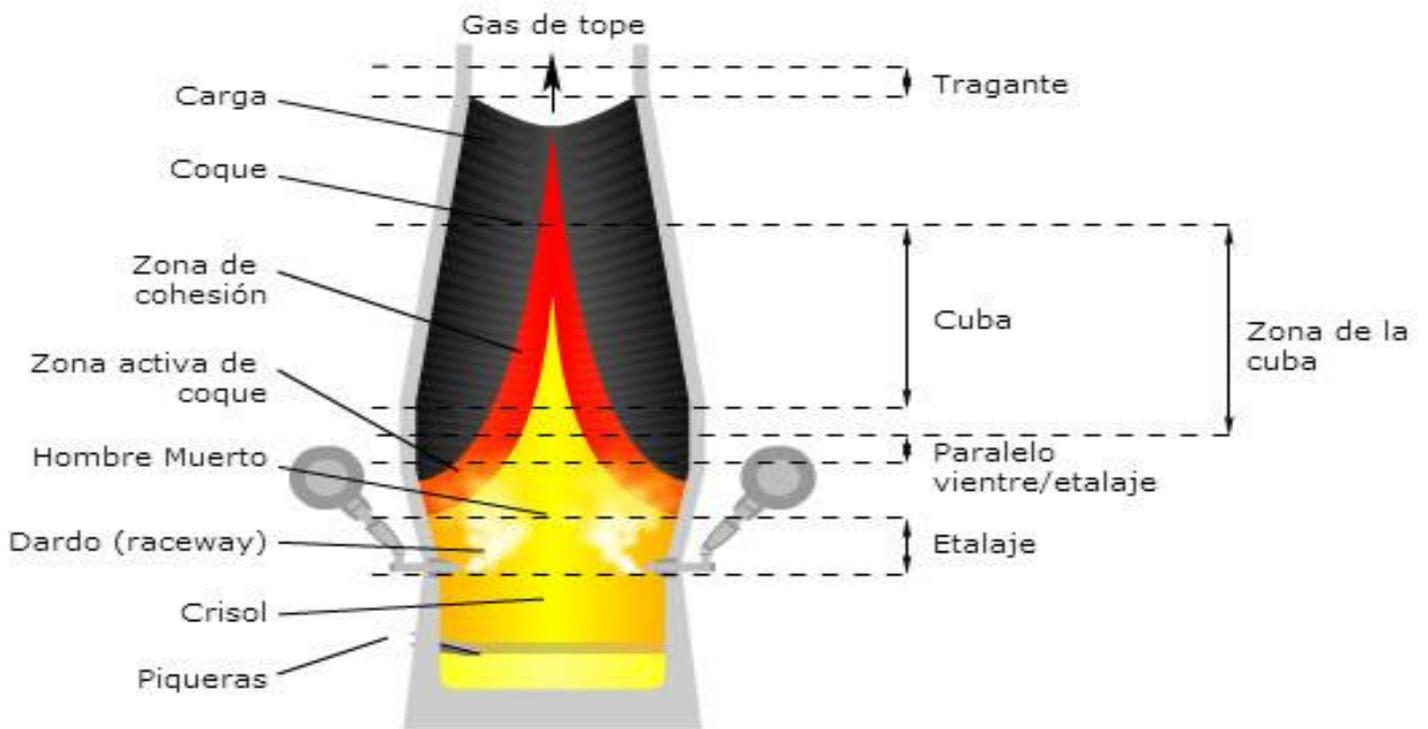
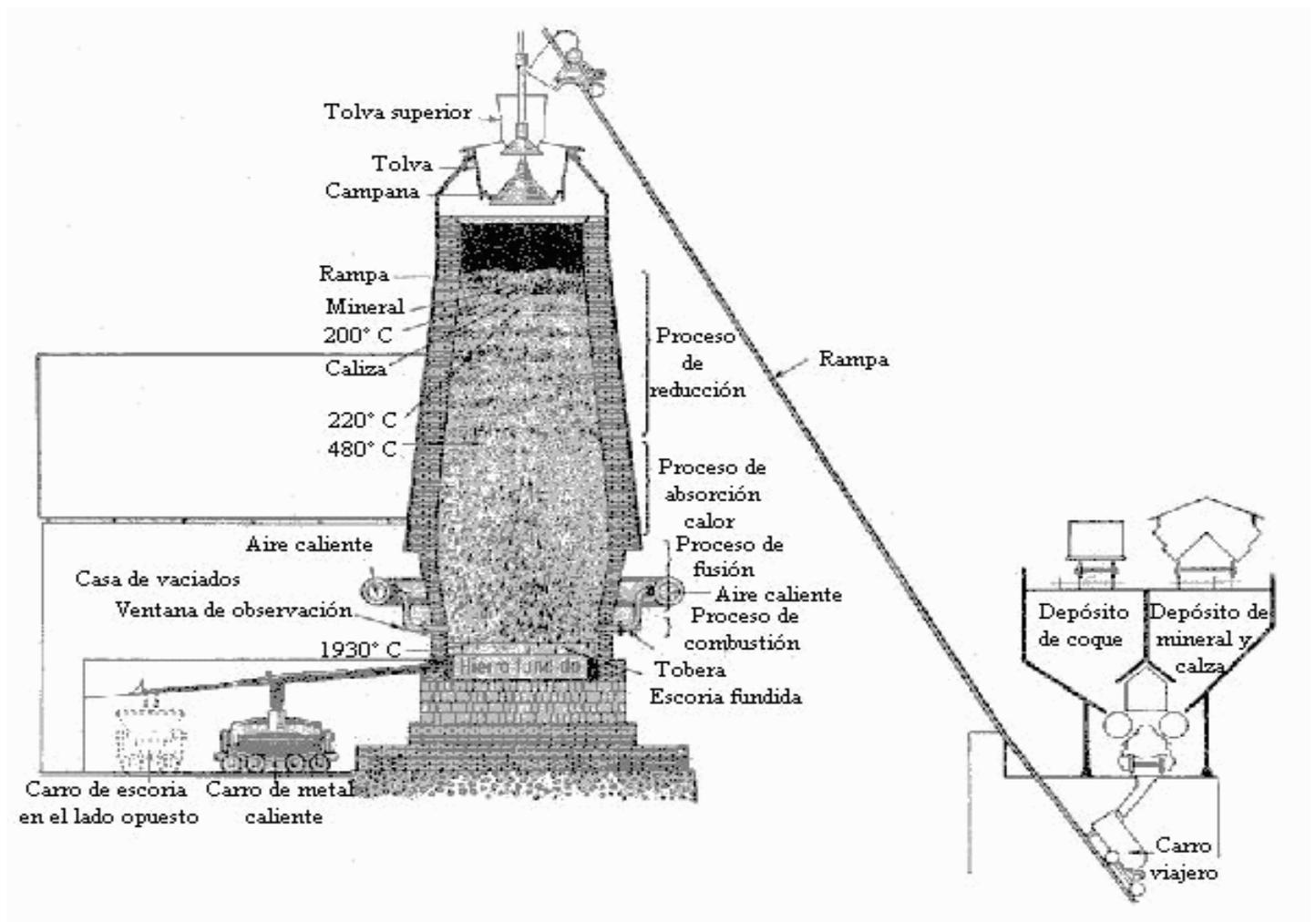
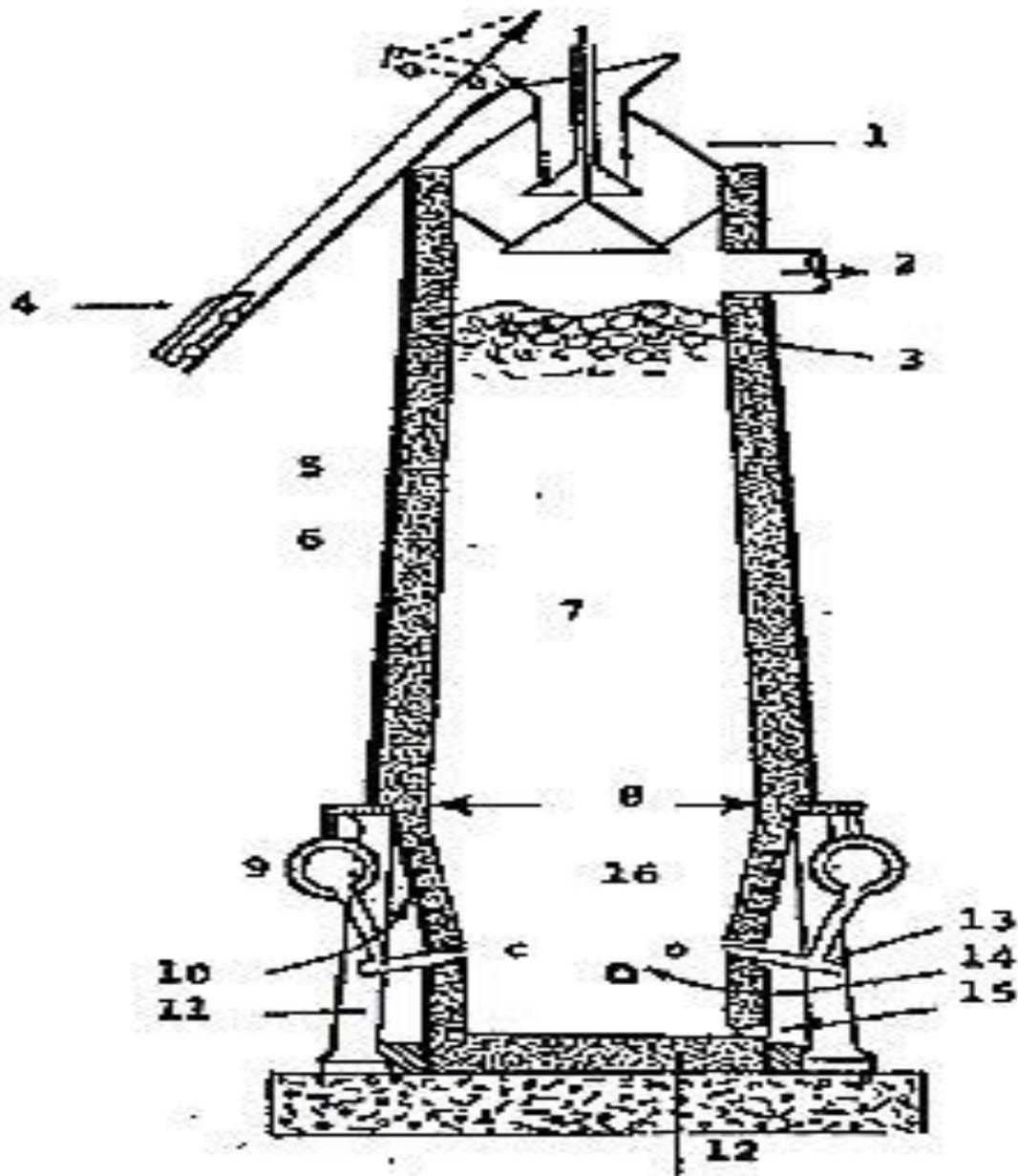
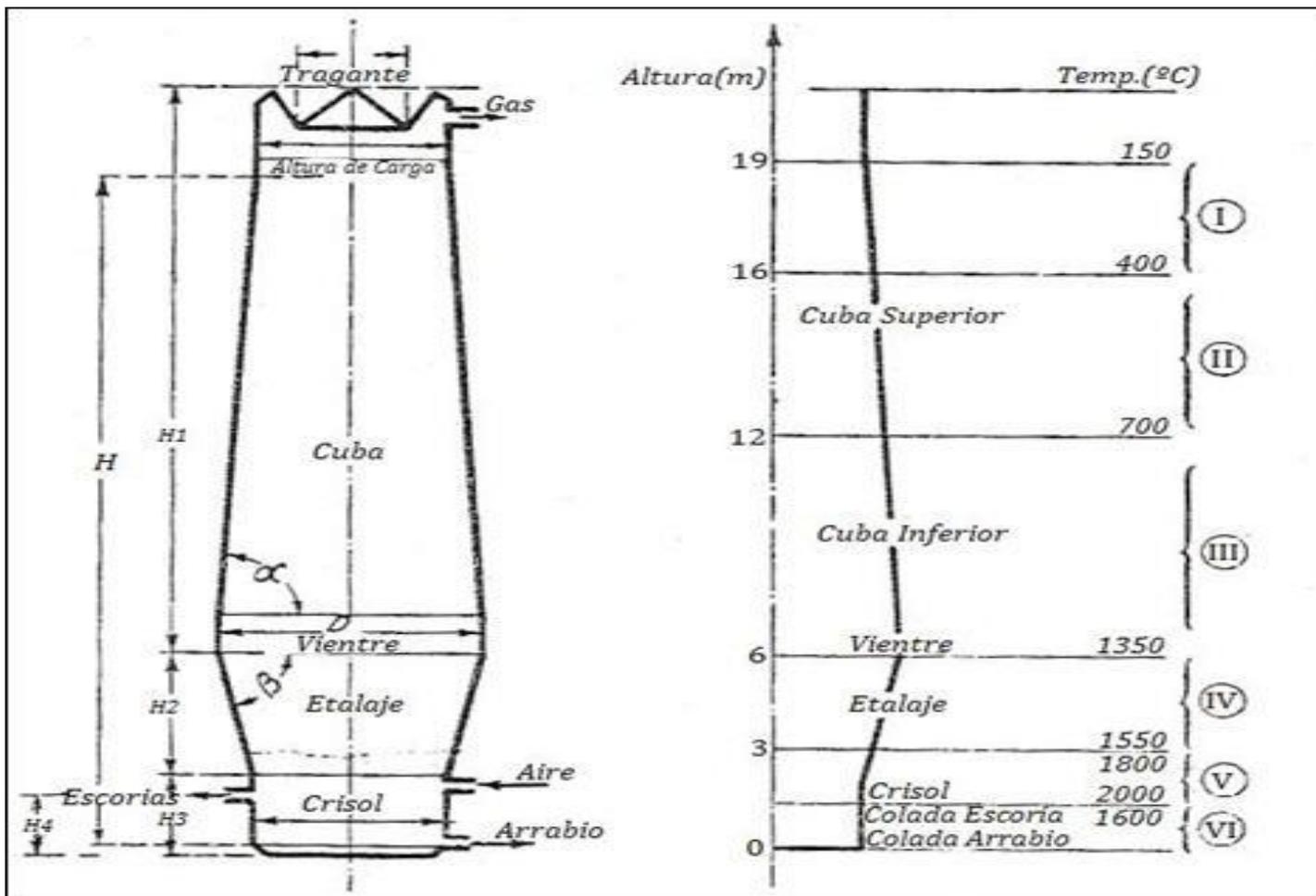


Figura 26. Esquema y vista seccional de las partes y zonas de un Alto Horno

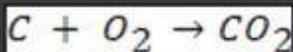


<i>1. Tragante y mecanismo de carga</i>	<i>2. Salida de gases</i>
<i>3. Nivel de carga</i>	<i>4. Vagoneta de carga</i>
<i>5. Cubierta de acero</i>	<i>6. Revestimiento refractario</i>
<i>7. Cuba</i>	<i>8. Vientre</i>
<i>9. Ducto de aire caliente</i>	<i>10. Agua de refrigeración</i>
<i>11. Columnas de soporte</i>	<i>12. Solera</i>
<i>13. Toberas</i>	<i>14. Orificio de escoria</i>
<i>15. Orificio de sangrado</i>	<i>16. Atalaje</i>

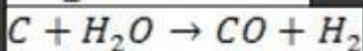
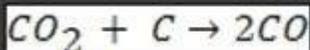
Figura 26. Nombres de las partes del Alto Horno.



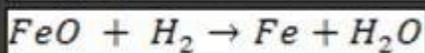
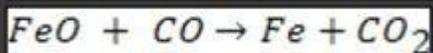
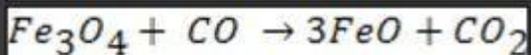
Combustión



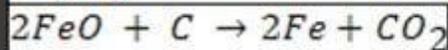
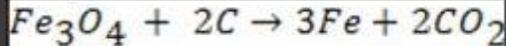
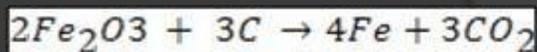
Formación de gases reductores



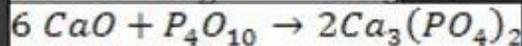
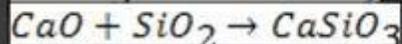
Reducción indirecta de los minerales



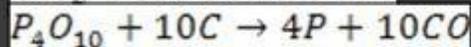
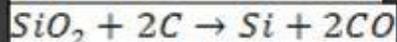
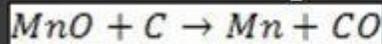
Reducción directa de los minerales



Formación de escorias



Formación de impurezas



Carburización del hierro



Figura 27. Zonas de Reacción presentes en el Alto Horno.

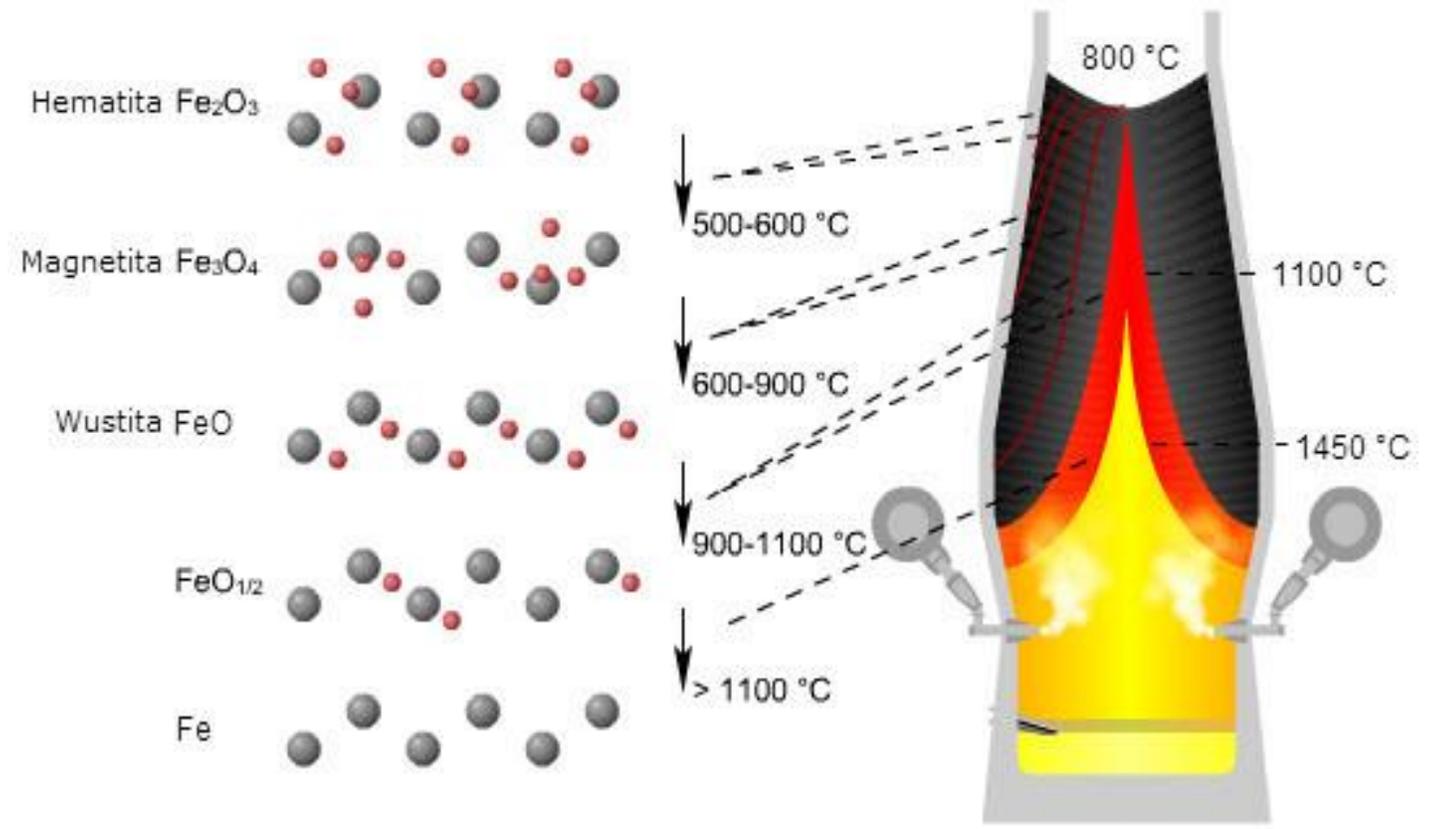
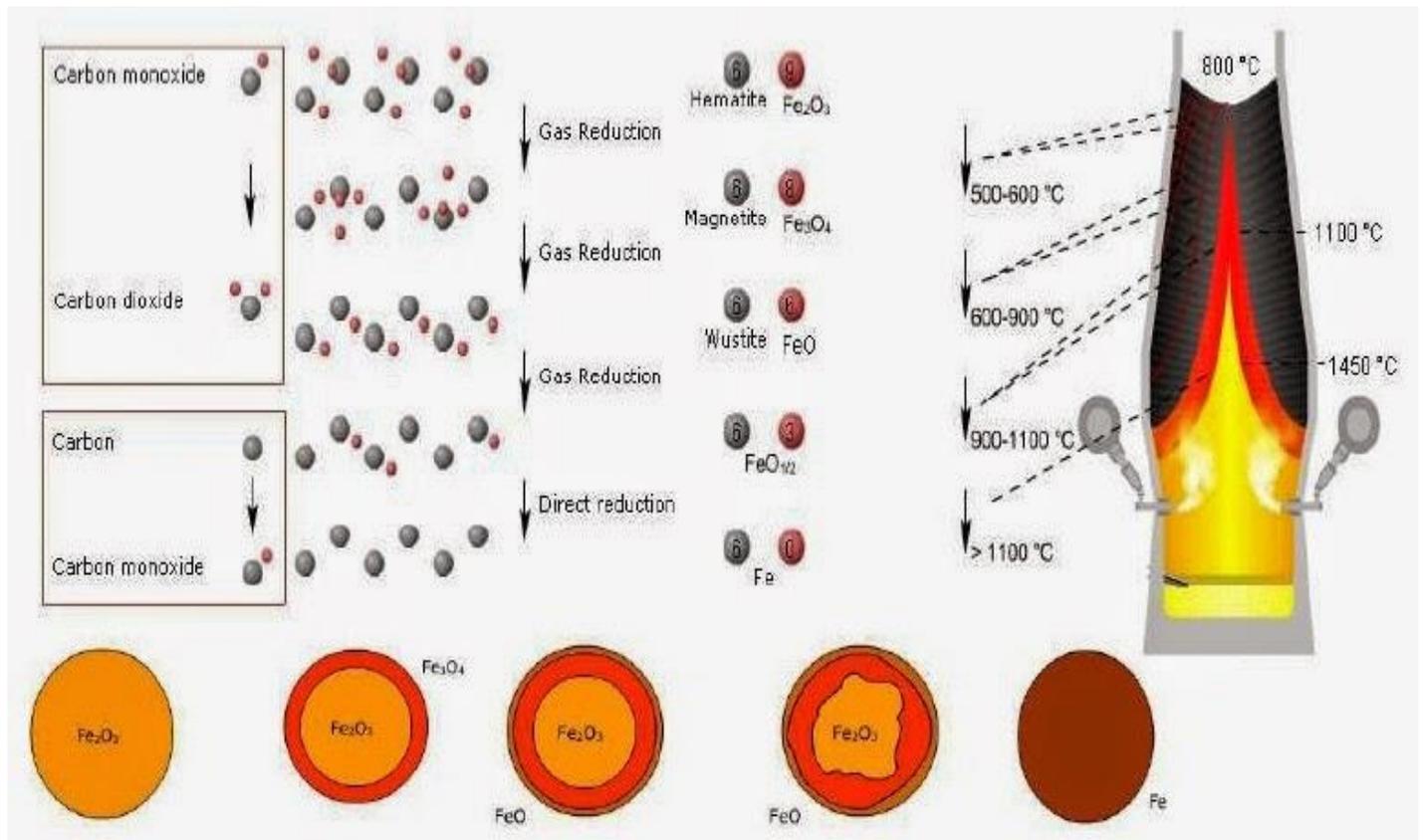


Figura 28. Reacciones de reducción y temperaturas de transformación de la carga en el Alto Horno.

1.3.3 Balance de materia y energía del alto horno.

El balance de materia de un horno es una contabilidad exacta de todos los materiales que entran, salen, acumulan o se agotan en el curso de un intervalo de tiempo de operación dado. Un balance de materia es de este modo una expresión de la ley de conservación de la masa teniendo en cuenta aquellos términos.

El balance térmico es un cálculo sumamente útil para todos los tipos de hornos, Es utilizado para diseñar hornos y procesos, calcular el requerimiento de combustible, determinar la eficiencia de hornos y un estudio térmico general de los procesos. El balance térmico general se expresa como:

$$\text{Ingreso de Calor al Sistema} = \text{Salida de calor del sistema} + \text{acumulación de calor en el sistema}$$

En procesos en estado estacionario, no existe acumulación de calor, por tanto, el balance térmico es la evaluación y catalogación de todas las partidas de calor suministrado o disponible y de las del calor perdido o distribuido, y donde siempre la suma de las partidas de calor suministrado debe ser igual a la suma de las partidas de calor distribuido.

En muchos casos no se puede determinar directamente el calor perdido por radiación, convección y conducción a los alrededores; pero todas las otras partidas son fácilmente calculables. La diferencia entre el calor total suministrado y la cantidad calculada del calor distribuido es por lo tanto el calor perdido por cualquier mecanismo de transferencia de calor, de esta manera, se igualarán ambas partidas.

El balance térmico de un horno varía fundamentalmente de un horno continuo a uno discontinuo. En los continuos interviene la producción en kg/h o en t/h, mientras que en los intermitentes es más importante la carga introducida en cada operación en kg o en t.

La temperatura en los hornos continuos es prácticamente constante en cada zona a lo largo del tiempo, y la temperatura de la carga varía a lo largo del horno desde la entrada hasta la salida. En los hornos discontinuos la temperatura de la carga varía a lo largo del tiempo, pero se mantiene relativamente constante en todo el horno en un instante dado.

El Balance Térmico general de un horno alto es el siguiente:

45 % de calorías que se consumen dentro del horno.

7 % de calorías se pierden por radiación.

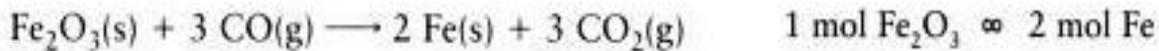
48% de calorías quedan en los gases y que a su vez vienen aprovechados como sigue :

14 % en las estufas COWPER

5 % se pierde como fugas

29 % quedan disponibles para la marcha de los calderos y de motores de gas.

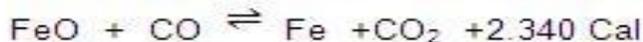
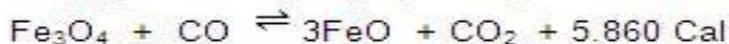
El requerimiento calórico de la desoxidación del hierro es la siguiente:



$$\text{Cantidad de Fe}_2\text{O}_3 \text{ (mol)} = 10,0 \text{ g Fe}_2\text{O}_3 \times \left(\frac{1 \text{ mol}}{159,69 \text{ g}} \right)$$

$$\text{Cantidad de Fe (mol)} = 10,0 \text{ g Fe}_2\text{O}_3 \times \left(\frac{1 \text{ mol}}{159,69 \text{ g}} \right) \times \left(\frac{2 \text{ mol Fe}}{1 \text{ mol Fe}_2\text{O}_3} \right)$$

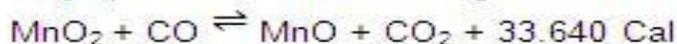
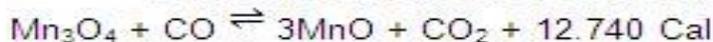
$$\begin{aligned} \text{Masa de Fe} &= 10,0 \text{ g Fe}_2\text{O}_3 \times \left(\frac{1 \text{ mol}}{159,69 \text{ g}} \right) \times \left(\frac{2 \text{ mol Fe}}{1 \text{ mol Fe}_2\text{O}_3} \right) \times \left(\frac{55,85 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \right) \\ &= 6,99 \text{ g Fe} \end{aligned}$$



- Solución del carbono por reacción de CO_2 :



- Descomposición de los óxidos de manganeso:



- ❖ Zona III (700° a 1350°C).

- Reducción directa del óxido férrico:



- Disociación de los carbonatos:



- Reducción de los óxidos de manganeso:



- Formación de la escoria primaria, silicatos:

El principio de contracorriente se utiliza en varios procesos químicos y metalúrgicos. Ejemplos típicos son la extracción por disolventes (en la que un líquido acuoso y uno orgánico se mueven a contracorriente), la destilación continua (en donde un líquido y un gas se mueven a contracorriente) y la reducción de menas de óxido dentro de un alto horno. El principio de contracorriente se utiliza también para intercambiar calor entre un fluido frío y uno caliente.

Ejemplos importantes de intercambio de calor se muestran a continuación.

La figura (a) muestra un recuperador de calor simple. En éste, los dos flujos están separados por una pared construida con un material resistente a la temperatura, como el acero.

En la figura (b) se ilustra la transferencia de calor desde un gas hacia una carga sólida como el alto horno de hierro.

La figura (c) muestra un regenerador de calor. En éste, el calor se transfiere primero desde un gas caliente hacia un arreglo de tabiques refractarios. Posteriormente, estos tabiques se utilizan para calentar el flujo de gas frío.

Los regeneradores se utilizan si las temperaturas relacionadas son muy elevadas para los materiales comunes del recuperador.

Ejemplos típicos son el precalentador de soplado para el alto horno de hierro, el cual se calienta usando gases calientes y combustión, y el generador para el horno de hogar abierto para la producción de acero en el que se utilizan los gases calientes del horno mismo para precalentar el aire de la combustión.

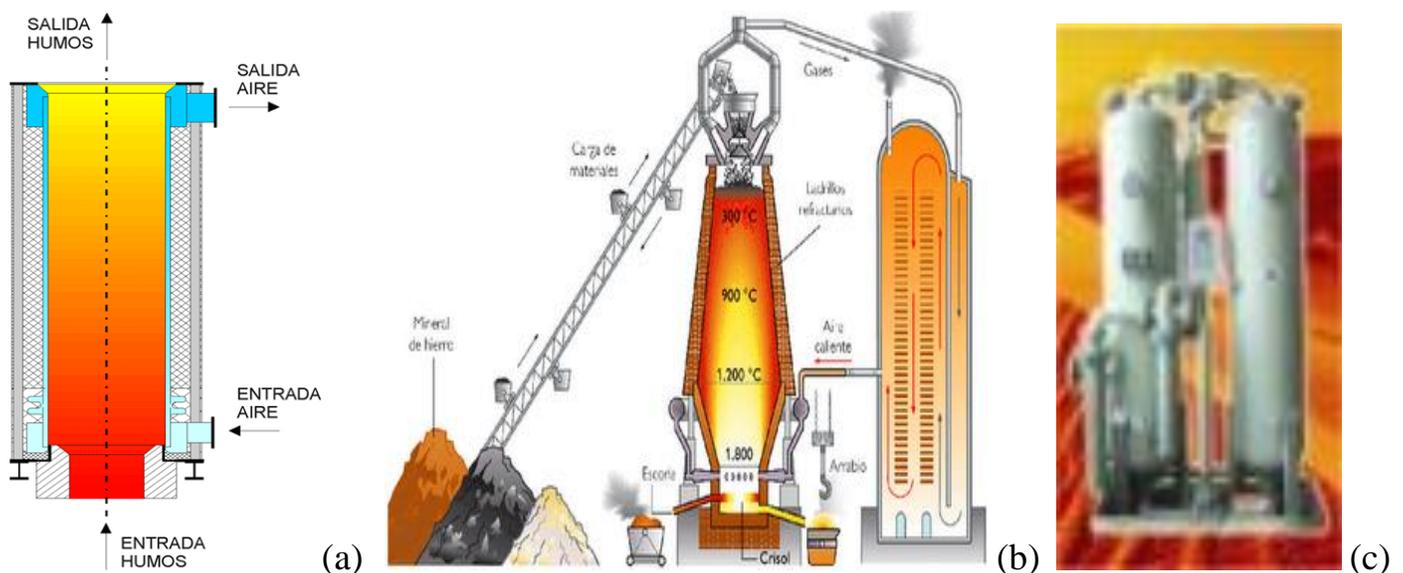


Figura 29. Representación gráfica de la transferencia de calor en el Alto Horno.

El arrabio suele contener bastantes impurezas no deseables, y es necesario someterlo a un proceso de afino en hornos llamados *convertidores*.

Aunque casi todo el hierro y acero que se fabrica en todo el mundo se obtienen a partir de arrabio producido en altos hornos, hay otros métodos de refinado del hierro que se han practicado de forma limitada.

Uno de ellos es el denominado método directo para fabricar hierro y acero a partir del mineral, sin producir arrabio. En este proceso se mezclan mineral de hierro y coque en un horno de calcinación rotatorio y se calientan a una temperatura de unos 950 °C. el coque caliente desprende monóxido de carbono, igual que en un alto horno, y reduce los óxidos del mineral a hierro metálico.

Sin embargo, no tienen lugar las reacciones secundarias que ocurren un alto horno, y el horno de calcinación produce la llamada esponja de hierro, de mucha mayor pureza que el arrabio. También puede producirse hierro prácticamente puro mediante electrólisis, haciendo pasar una corriente eléctrica a través de una disolución de cloruro de hierro (II). Ni el proceso directo ni el electrolítico tienen importancia comercial significativa.

El óxido de hierro (III) reacciona con carbono para dar hierro y monóxido de carbono.



- ¿Cuántos gramos de C se requieren para reaccionar con 2.5 moles de Fe_2O_3 ?
- ¿Cuántos gramos de CO se producen cuando reaccionan 45 g de C?
- ¿Cuántos gramos de Fe se producen cuando reaccionan 6 g de Fe_2O_3 ?

Figura 30. Ejercicio estequiométrico de reacciones en el Alto Horno.

Consumo diario de un alto horno grande (10.000 toneladas/día de arrabio)

- 16.000 – 20.000 toneladas de mineral de hierro
- 4.000 – 6.000 toneladas de coque (y carbón pulverizado)
- 2.000 – 4.000 toneladas de fundente
- 11.000 kNm³ de aire comprimido

Genera:

- 5.000 toneladas de escoria + polvo del tragante
- 15.000 kNm³ de gas del tragante

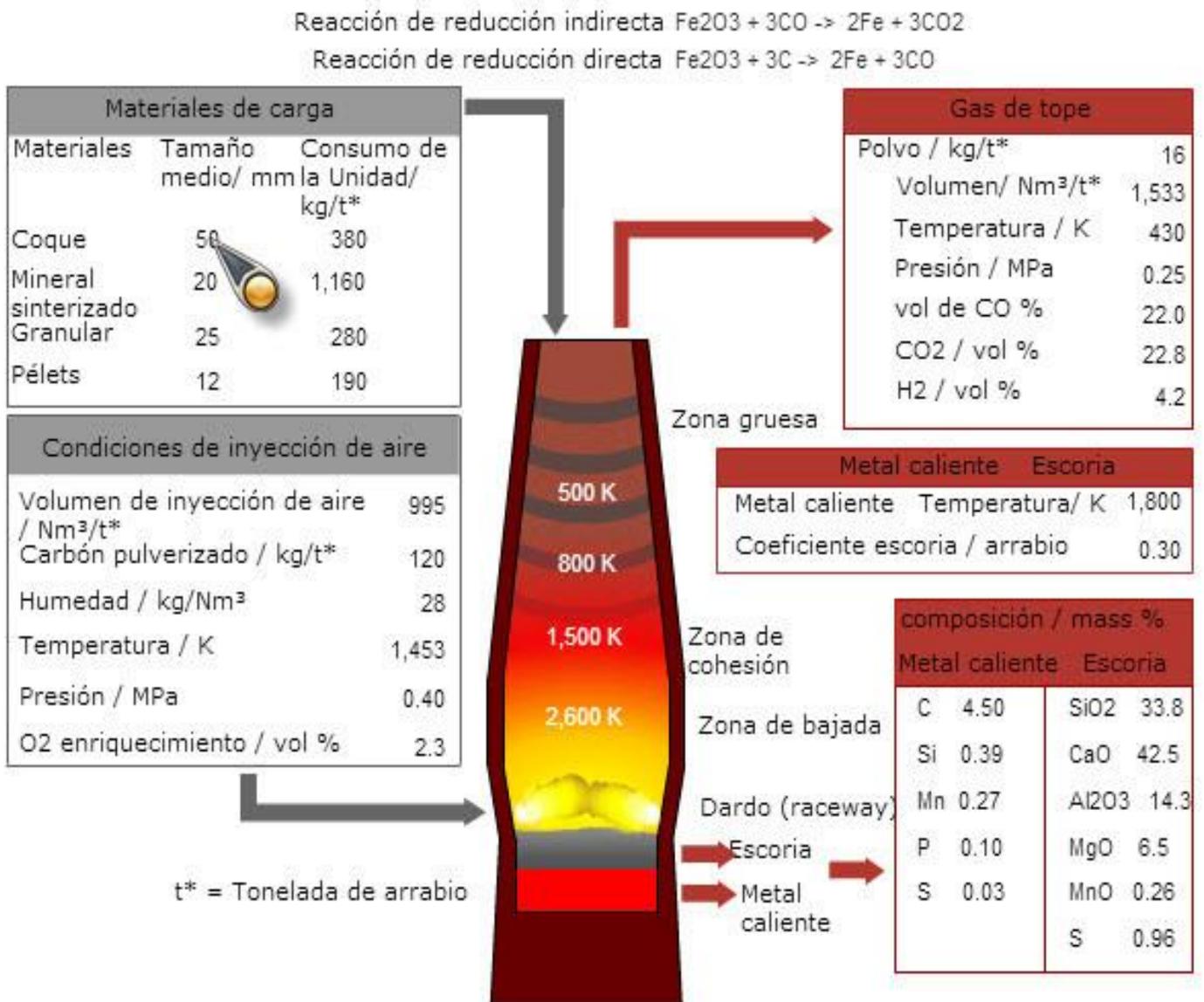
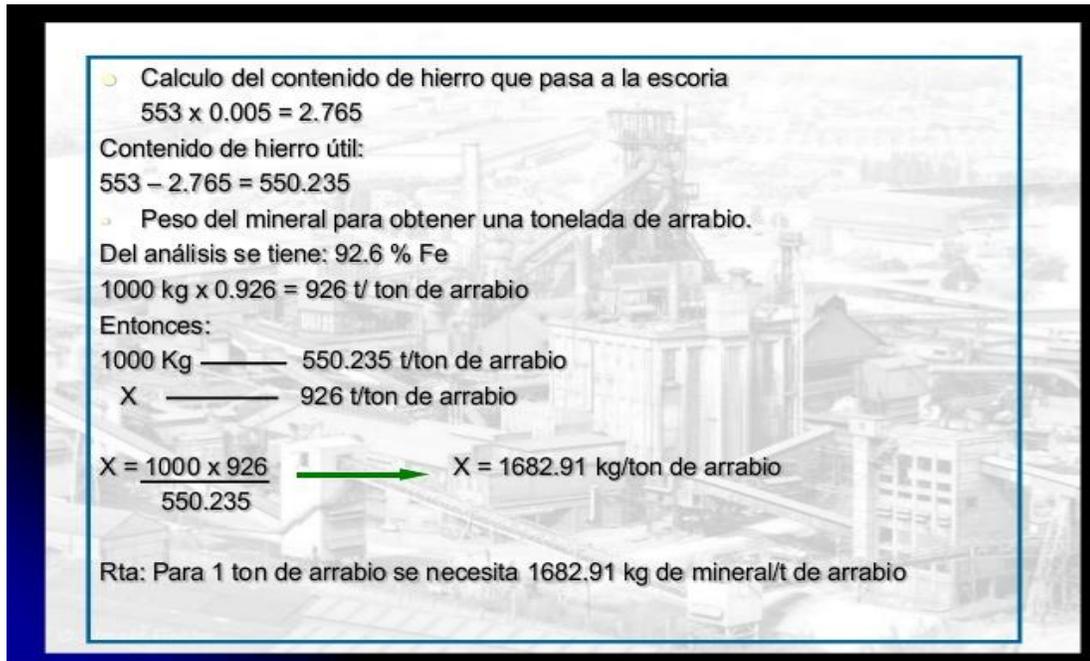


Figura 31. Esta figura muestra un balance de masa general para el proceso de alto horno, en base a 1 tonelada por producción de arrabio.



○ Cálculo del contenido de hierro que pasa a la escoria
 $553 \times 0.005 = 2.765$
 Contenido de hierro útil:
 $553 - 2.765 = 550.235$

○ Peso del mineral para obtener una tonelada de arrabio.
 Del análisis se tiene: 92.6 % Fe
 $1000 \text{ kg} \times 0.926 = 926 \text{ t/ ton de arrabio}$

Entonces:
 $1000 \text{ Kg} \text{ ————— } 550.235 \text{ t/ton de arrabio}$
 $X \text{ ————— } 926 \text{ t/ton de arrabio}$

$X = \frac{1000 \times 926}{550.235} \rightarrow X = 1682.91 \text{ kg/ton de arrabio}$

Rta: Para 1 ton de arrabio se necesita 1682.91 kg de mineral/t de arrabio

Figura 32. Ejemplo de un balance de arrabio por ton de mineral para el proceso de alto horno

Se carga un alto horno con mineral de hierro, caliza y coque con los siguientes análisis:

Material	Análisis en % (Peso)						
	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	H ₂ O	C	CaCO ₃
Mineral de hierro	80	12	1	3	4		
Caliza		4			1		95
Coque		10				90	

El análisis del arrabio producido es:

C: 4% Si: 1,2 % Mn: 1 % Fe: 93,8%

Se utilizan 1750 kg. de mineral de hierro y 500 kg. de piedra caliza por cada tonelada de arrabio producido.

El volumen de los gases de salida por tonelada de arrabio es 4200 m³.

Gases de salida; Su composición es:

CO: 26% CO₂: 12% H₂O: 4% N₂: 58%

Calcular:

- La cantidad de coque utilizado por tonelada de arrabio
- Composición de la escoria
- Consumo de aire (m³) por tonelada de arrabio

1.3.4. Tratamiento externo de arrabio.

Tras el proceso de extracción del arrabio en el alto horno, éste se procesa para obtener los productos; hierro dulce, fundiciones y aceros con los que se elaboran los subproductos comerciales finales. Puede ocurrir que se produzca más arrabio que el que se pueda utilizar inmediatamente, en este caso parte de él se deposita en unos recipientes (moldes) denominados lingoteras para procesarlos posteriormente. El proceso de fabricación se divide en dos fases:

1. La fase de fusión. Una vez introducida la chatarra en el horno y los agentes reactivos y escorificante (principalmente cal) se desliza la bóveda hasta cerrar el horno y se bajan los electrodos hasta la distancia apropiada, haciéndose saltar el arco hasta fundir completamente los materiales cargados. El proceso se repite hasta completar la capacidad del horno, constituyendo este acero una colada.
2. La fase de afino se lleva a cabo en dos etapas. La primera en el propio horno y la segunda en un horno cuchara. En el primer afino se analiza la composición del baño fundido y se procede a la eliminación de impurezas y elementos indeseables (silicio, manganeso, fósforo, etc.) y realizar un primer ajuste de la composición química por medio de la adición de ferroaleaciones que contienen los elementos necesarios (cromo, níquel, molibdeno, vanadio, titanio, etc.). El acero obtenido se vacía en una cuchara de colada, revestida de material refractario, que hace la función de cuba de un segundo horno de afino en el que termina de ajustarse la composición del acero y de dársele la temperatura adecuada para la siguiente fase en el proceso de fabricación.

Elemento Forma de eliminación por Reacción química:

- Carbono. Al combinarse con el oxígeno se quema dando lugar a un gas gaseoso que se elimina a través de los humos.
- Manganeso. Se oxida y pasa a la escoria. Combinado con sílice da lugar a silicatos.
- Silicio. Se oxida y pasa a la escoria. Forma silicatos
- Fósforo. En una primera fase se oxida y pasa a la escoria. En presencia de carbono y altas temperaturas puede revertir al baño. Para fijarlo a la escoria se añade cal formándose fosfato de calcio.
- Azufre. Su eliminación debe realizarse mediante el aporte de cal, pasando a la escoria en forma de sulfuro de calcio. La presencia de manganeso favorece la desulfuración. Principales reacciones químicas en el afino

Finalizado el afino la cuchara de colada se lleva hasta la artesa receptora de la colada continua donde vacía su contenido en una artesa receptora dispuesta al efecto.

Posteriormente el arrabio se conduce a ser materia prima de los siguientes productos:

Hierro dulce

Se denomina hierro dulce al hierro cuyo contenido en carbono es inferior al 0,1 %. En estas condiciones puede considerarse químicamente puro. Es un material de color plateado, de gran permeabilidad magnética, dúctil y maleable.

Admite la forja, por lo que también se le denomina hierro forjado. Puede obtenerse por procedimientos electrolíticos, a partir de baños de sulfato y cloruro de hierro. El material que resulta se emplea para conducción eléctrica por su baja resistividad. Sin embargo, resulta muy poroso, se oxida con gran facilidad y presenta con frecuencia grietas internas que lo hacen poco útil para otras aplicaciones industriales.

Fundiciones

El arrabio o fundición de primera fusión, como ya hemos indicado, es el material que se obtiene directamente del horno alto. Cuando solidifica resulta un material muy duro, pero su contenido en carbono y otras impurezas hace que sea frágil y quebradizo y que no admita la forja ni la soldadura.

En estas condiciones no puede utilizarse para fabricar piezas que vayan a estar sometidas a esfuerzos. Según las impurezas que contiene, se distinguen la fundición gris y la fundición blanca, nombre que reciben por el aspecto que presenta su superficie de fractura. La fundición gris se obtiene cuando el contenido de silicio es elevado.

El carbono cristaliza entonces en forma de grafito y sólo puede emplearse para piezas moldeadas (procedimiento que se verá mas adelante). . La fundición blanca se obtiene cuando el contenido de manganeso es elevado. En estas condiciones, el carbono se combina con el hierro formando carburo de hierro y se utiliza como una de las materias primas para la obtención del acero.

Para conseguir un material duro, resistente y tenaz, es necesario reducir el contenido de carbono y modificar la composición de los demás elementos presentes en el arrabio. Esta operación se denomina afinado y de ella se obtienen los aceros.

Aceros

Cuando se consigue reducir el contenido en carbono del hierro por debajo del 1,76 % se obtiene el acero. El acero es una aleación de hierro y carbono en la que el contenido de carbono oscila entre el 0,1 % y el 1,76 %, Y puede contener en su composición otros elementos metálicos o no metálicos. Los elementos que aparecen en la composición de los diferentes tipos de aceros son los que se encargan de dotarlos de las propiedades que los caracterizan. Además del carbono, podemos encontrar silicio, manganeso, cromo, níquel, molibdeno, vanadio y wolframio. Los diferentes tipos de acero se clasifican de acuerdo a los elementos de aleación que producen distintos efectos en el Acero:

Aceros de baja aleación ultrarresistentes

Esta familia es la más reciente de las cuatro grandes clases de acero. Los aceros de baja aleación son más baratos que los aceros aleados convencionales ya que contienen cantidades menores de los costosos elementos de aleación. Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono.

Por ejemplo, los vagones de mercancías fabricados con aceros de baja aleación pueden transportar cargas más grandes porque sus paredes son más delgadas que lo que sería necesario en caso de emplear acero al carbono. Además, como los vagones de acero de baja aleación pesan menos, las cargas pueden ser más pesadas.

En la actualidad se construyen muchos edificios con estructuras de aceros de baja aleación. Las vigas pueden ser más delgadas sin disminuir su resistencia, logrando un mayor espacio interior en los edificios.

Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación, que los mantienen brillantes y resistentes a la herrumbre y oxidación a pesar de la acción de la humedad o de ácidos y gases corrosivos. Algunos aceros inoxidables son muy duros; otros son muy resistentes y mantienen esa resistencia durante largos periodos a temperaturas extremas.

Debido a sus superficies brillantes, en arquitectura se emplean muchas veces con fines decorativos. El acero inoxidable se utiliza para las tuberías y tanques de refinерías de petróleo o plantas químicas, para los fuselajes de los aviones o para cápsulas espaciales.

También se usa para fabricar instrumentos y equipos quirúrgicos, o para fijar o sustituir huesos rotos, ya que resiste a la acción de los fluidos corporales. En cocinas y zonas de preparación de alimentos los utensilios son a menudo de acero inoxidable, ya que no oscurece los alimentos y pueden limpiarse con facilidad.

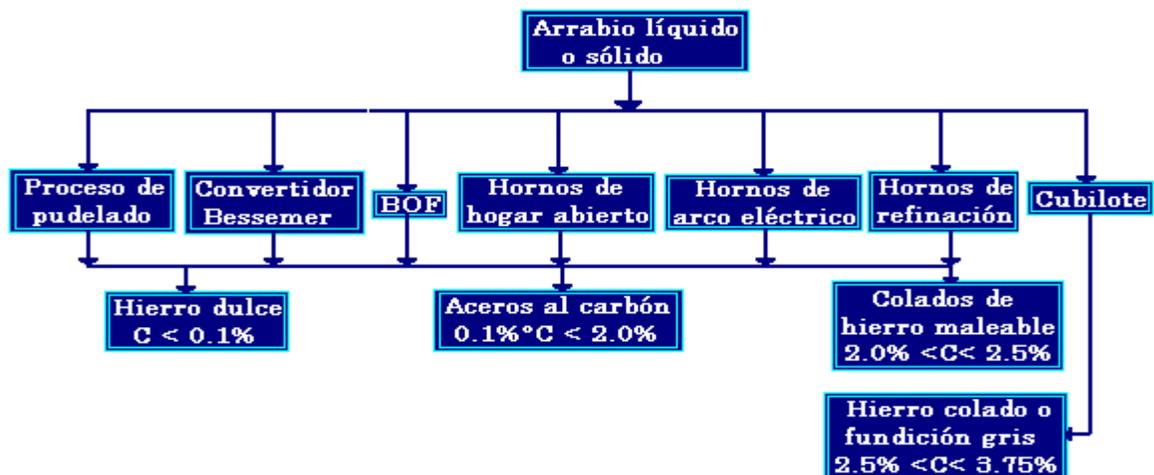
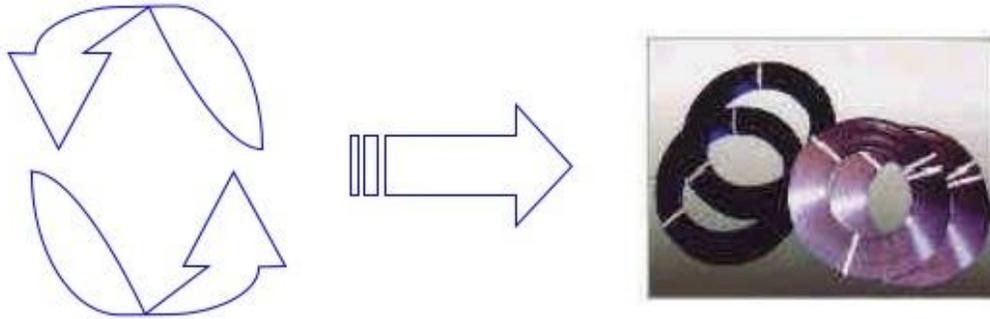


Figura 33. Destino posterior del arrabio de alto horno.

1.4. Reducción Directa.

PROCESO DE REDUCCIÓN DIRECTA.

Es un proceso en el cual el mineral de hierro se hace reaccionar en un reactor a base de gas natural e hidrógeno, para producir hierro metálico.



Los tipos de procesos de reducción directa que existen son los siguientes:

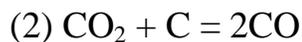
- **HYL**
- **FIOL**
- **MIDREX**

El proceso de reducción directa es intrínsecamente más eficiente que el alto horno de energía, ya que opera a una temperatura más baja, y hay varios otros factores que hacen que resulte económico.



Figura 34. Definición del proceso de reducción directa del mineral de hierro y su impacto económico.

El óxido de hierro de baja valencia (FeO) reacciona directamente con las partículas de coque en la zona caliente por encima del dardo (raceway), generando hierro metálico y gas de CO. En realidad, ocurre en 2 procesos consecutivos: reducción de CO del FeO y conversión inmediata de CO₂ a CO en contacto con el coque:



En un alto horno moderno, la reducción directa elimina alrededor de 1/3 del oxígeno de la carga, dejando que el 2/3 restante sea eliminado por la reacción de reducción del gas (reducción indirecta).

La reducción directa usa carbono (coque) como reductor y genera gas de CO extra. La reducción directa cuesta mucha energía. La reducción directa también se llama pérdida de solución (definida como la cantidad de coque que se usa para la reducción) y puede calcularse y monitorearse en línea.

Los estados relevantes de la alimentación de mineral de hierro se indican en el orden de la hematita, la magnetita, la wustita y a través de $\text{FeO}_{0.5}$ a hierro metálico. El proceso de reducción de las partículas de mineral de hierro (pélets o sinter) es un proceso de eliminación del oxígeno de los óxidos de hierro.

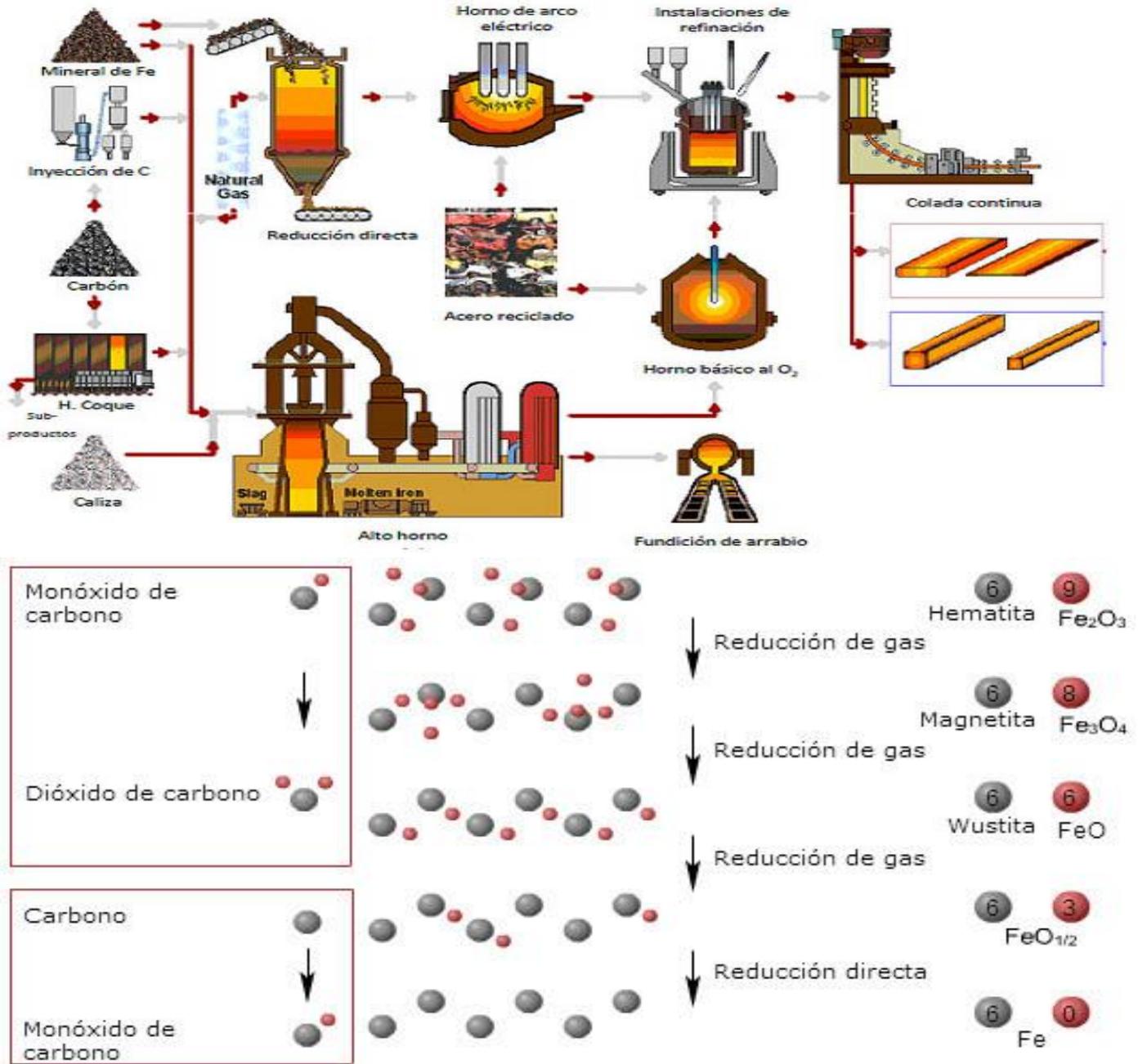
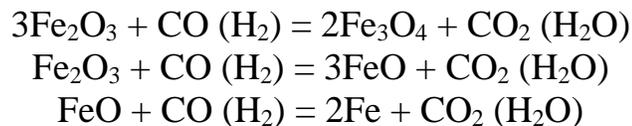


Figura 35. Alternativa del proceso de reducción y transformación de la carga de mineral de hierro por reducción directa.

Cinética de la Reducción del Mineral de Hierro

La reducción del mineral de hierro por los gases de carbono y de hidrógeno es un proceso muy complicado. Para una mejor comprensión de los factores que influyen la reductibilidad de los minerales, sínters y pélets a continuación figura una vista muy simplificada de las reacciones de control de la velocidad.

En la mayoría de los casos, el mineral de hierro se encuentra en la forma de hematita, y la reducción comienza de la hematita y procede en el siguiente orden: hematita (Fe_2O_3) > magnetita (Fe_3O_4) > wustita (FeO) > hierro metálico (Fe).



Proceso de reducción: Comenzando con una esfera densa de hematita (similar a los pélets), una reducción inicial con CO o H_2 produce una capa de hierro metálico en contacto con la wustita. Hacia adentro desde la wustita hay una capa de magnetita que rodea el centro de la hematita.

Tal estructura en capas es típica del gas topoquímico: relaciones sólidas en las que la interfase de reacción entre los reductores sólidos y los productos sólidos se mueve en forma paralela a la superficie sólida original.

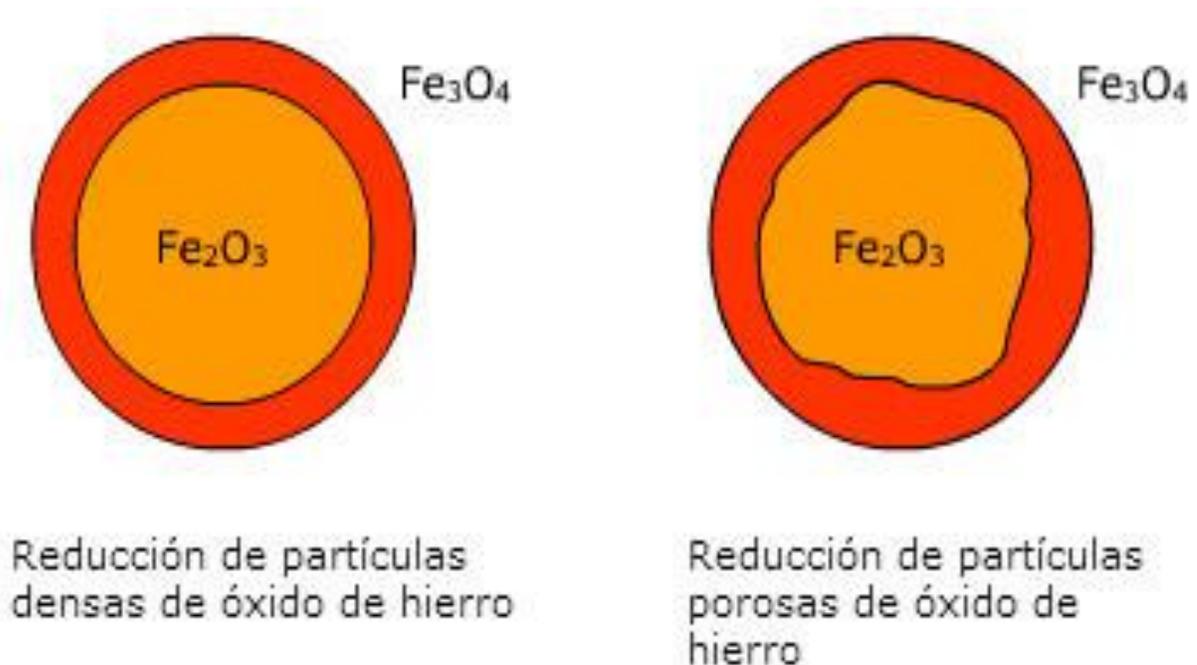


Figura 36. Reducción directa de partículas de mineral de hierro.

La reducción del óxido de hierro es un proceso de eliminación del oxígeno de los minerales de hierro por etapas. La reducción gas-sólido del mineral de hierro ocurre en los siguientes 3 pasos:

1. Difusión de los reductores gaseosos (CO o H_2) a través de las capas límite de gas-sólido hacia adentro a través de capas porosas de hierro, wustita y magnetita.
2. El reductor gaseoso es absorbido en las superficies sólidas y los iones de oxígeno se difunden a través de las capas para reaccionar en la interfase. Reducción de todos los óxidos simultáneamente en todas las interfaces de acuerdo con las tres reacciones arriba explicadas de manera similar.
3. Los productos gaseosos (CO_2 or H_2O) se difunden hacia afuera de las capas de los productos porosos.

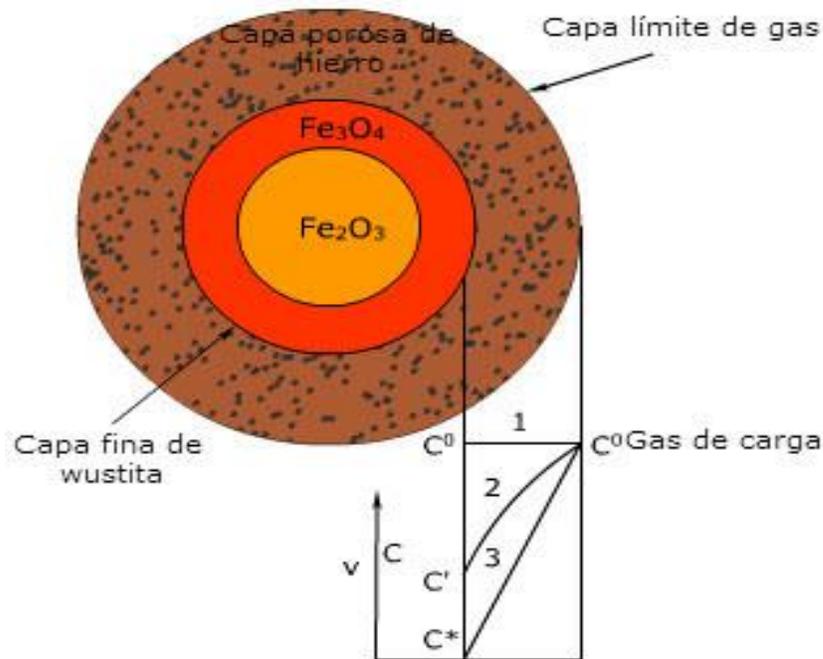


Figura 37. Diagrama esquemático de la reducción gaseosa de óxido férrico esférico.

Si la capa de los productos es densa, la reductibilidad del mineral será pobre y presentará una velocidad mínima. La velocidad de reducción total se determina por el paso más lento en una cadena de estos procesos.

La reducción de los óxidos de hierro se realiza mediante los gases de CO y H_2 , así como también por las partículas de coque sólido. El gas de CO se genera a través de la combustión del coque en el dardo (raceway) y de la reacción de la gasificación denominada reacción Boudouard a una temperatura por encima de los $1100\text{ }^\circ\text{C}$.

1.4.1. Instalación y Equipo auxiliares

Para un mejor estudio de los distintos procedimientos de reducción directa del mineral de hierro, en primer lugar conviene ordenarlos dentro de una clasificación. Advertimos que para ello vamos a tener en cuenta, en primer lugar, el tipo de reductor que utilizan, así como el tipo de horno o reactor que emplean.

Por otra parte, vamos a incluir en esta descripción general no sólo a los procesos que se están empleando ahora industrialmente para la fabricación de un producto metalizado para ser usado en sustitución de la chatarra, sino asimismo a aquellos otros procedimientos que merecen ser recordados, aunque sea brevemente, por alguno de los siguientes motivos:

- A. Su papel pionero en el desarrollo de la reducción directa, aunque en estos momentos estén abandonados o dedicados a la fabricación de otros productos específicos. Así, tenemos los procesos Wiberg y Re-un Krupp y el proceso Hogannas, respectivamente.
- B. Aquellos que han marcado una característica de originalidad manifiesta, aunque no hayan pasado en su desarrollo de la planta piloto o de la planta semi-industrial,



Figura 38. Descripción general de la reducción directa del mineral de hierro.

Una cosa cierta es que realmente casi todos los procesos de reducción directa se encuentran en una fase de, desarrollo y mejora, y aun aquellos que se consideran más experimentados cada vez que se monta una instalación nueva, ésta ofrece una _mejoras sensibles, principalmente en cuanto a diseño mecánico y equipos auxiliares.

Cada vez que se relatan los procesos de reducción directa hay cambios en su descripción y aparecen nuevos procesos y se olvidan otros. Naturalmente aún no se tiene la experiencia ganada en el Horno Alto, pero se va conociendo cada vez mejor las bases científicas de reducción directa, al trabajarse en mayor número de unidades y ello, a su vez, hará que se construyan nuevas instalaciones.



Figura 39. Descripción de los procesos de reducción directa del mineral de hierro.

La tecnología básica de la reducción del mineral de hierro fue desarrollada en la década de 1950, pero la aplicación de esta tecnología ha sido difícil y ha necesitado mucho tiempo. Ahora parece que, por el conocimiento de esas bases científicas y la solución de problemas de tipo mecánico y en instalaciones auxiliares, puede significar el despegue definitivo de estos procesos.

De acuerdo a lo indicado más arriba, se pueden clasificar así:

1. Procesos que utilizan reductores sólidos para la reducción del mineral de hierro.
 - 1.1. Hornos que trabajan en marcha discontinua con retortas o potes. Está el antiguo sistema Hogannas.
 - 1.2. Hornos de cuba. Incluimos el proceso de P. Echeverría, Legazpia.
 - 1.3. Hornos rotatorios. Además del antiguo proceso Renn Krupp, incluyendo a los procesos SL-RN y Krupp.
2. Procesos que utilizan reductores gaseosos para la reducción directa.
 - 2.1. hornos de cuba. Aquí tenemos el proceso Wiberg-Soderfors, hoy abandonado. pero de destacado papel en la Siderurgia sueca durante cuarenta años. Asimismo, los procesos Midres, Armco y Purofer.
 - 2.2. Procesos con reactores especiales. El de más importancia es, sin duda, el HYL.
 - 2.3. Procesos en lecho fluidizado. Aparte del 11 Iron, que no ha alcanzado el nivel industrial, están los procesos FIOR y HIB (antes Nu-Iron), que son los que parece que tendrán mayor importancia futura, El Novalfer está dedicado a la pulvimetalurgia.

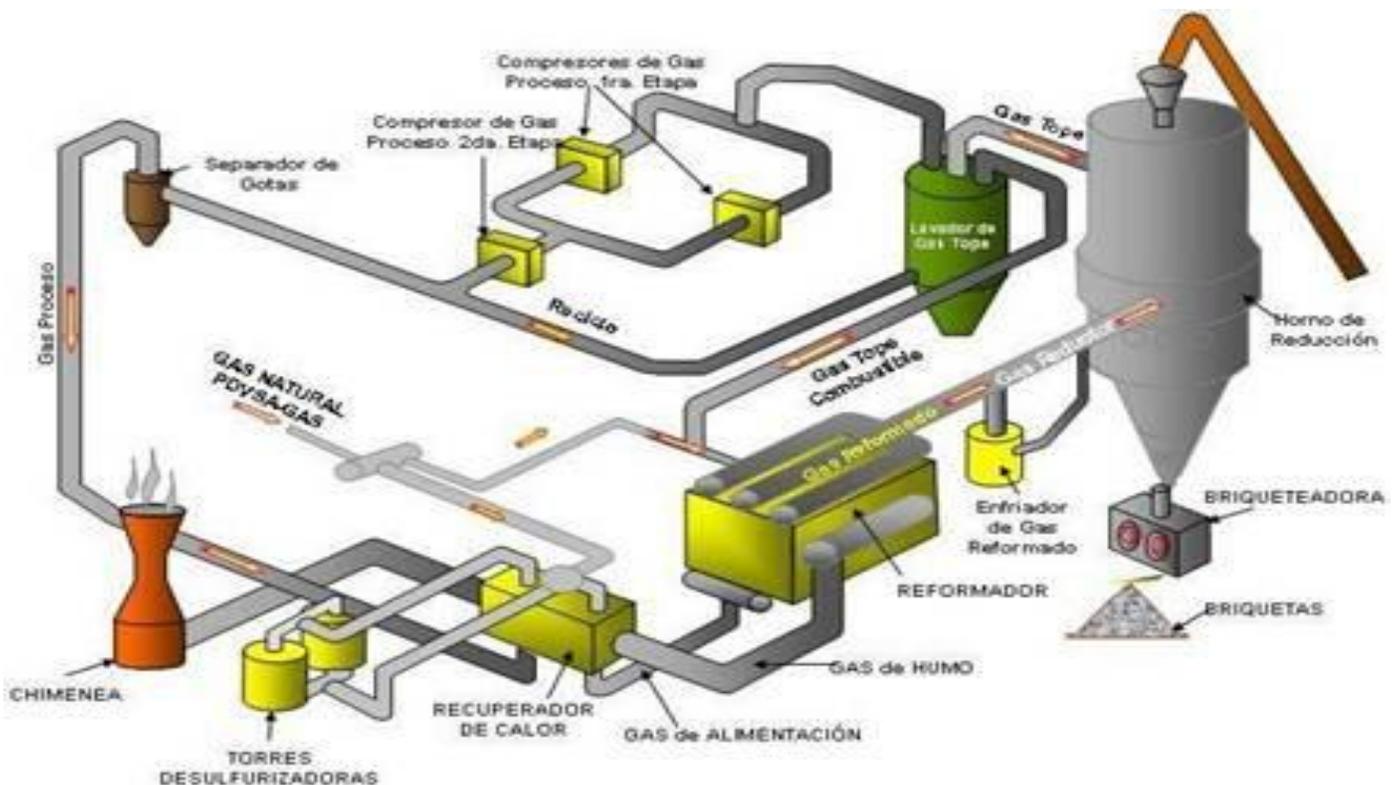


Figura 40. Ejemplo de la tecnología de la reducción directa del mineral de hierro.

1.4.2. Operación del Proceso.

Tecnologías Alternativas de la Producción de Hierro

Se encuentran disponibles dos tipos principales de los procesos comerciales alternativos de producción de hierro:

Reducción directa (RD): La reducción directa consiste en la producción de hierro sólido a partir de minerales de hierro y de un agente reductor (por ej. el gas natural). El producto sólido se denomina hierro de reducción directa (HRD) y se usa principalmente como material de carga en los hornos de arco eléctrico. El proceso de reducción directa ha sido comercializado desde la década de 1970 y se han desarrollado una variedad de procesos.

Reducción por fusión (RF): Este proceso combina la reducción del mineral de hierro con la fusión en un reactor, sin usar coque. El producto es arrabio líquido, el cual puede tratarse y refinarse de la misma manera que el arrabio de un alto horno. En la actualidad, sólo una variante de RF ha demostrado ser comerciable (COREX), pero una cantidad de variantes se encuentran en un estado avanzado de desarrollo.

Tecnologías Alternativas: Procesos Hierro de Reducción Directa y MIDREX

Procesos de HRD

Varios métodos se han usado durante los últimos 50 años para producir hierro de reducción directa. En la práctica, funcionan tres procesos principales:

MIDREX

HyL (I, II y III)

FIOR

Sólo recientemente se han desarrollado cinco técnicas nuevas:

FINMET

FASTMET

IRON CARBIDE,

CIRCORED,

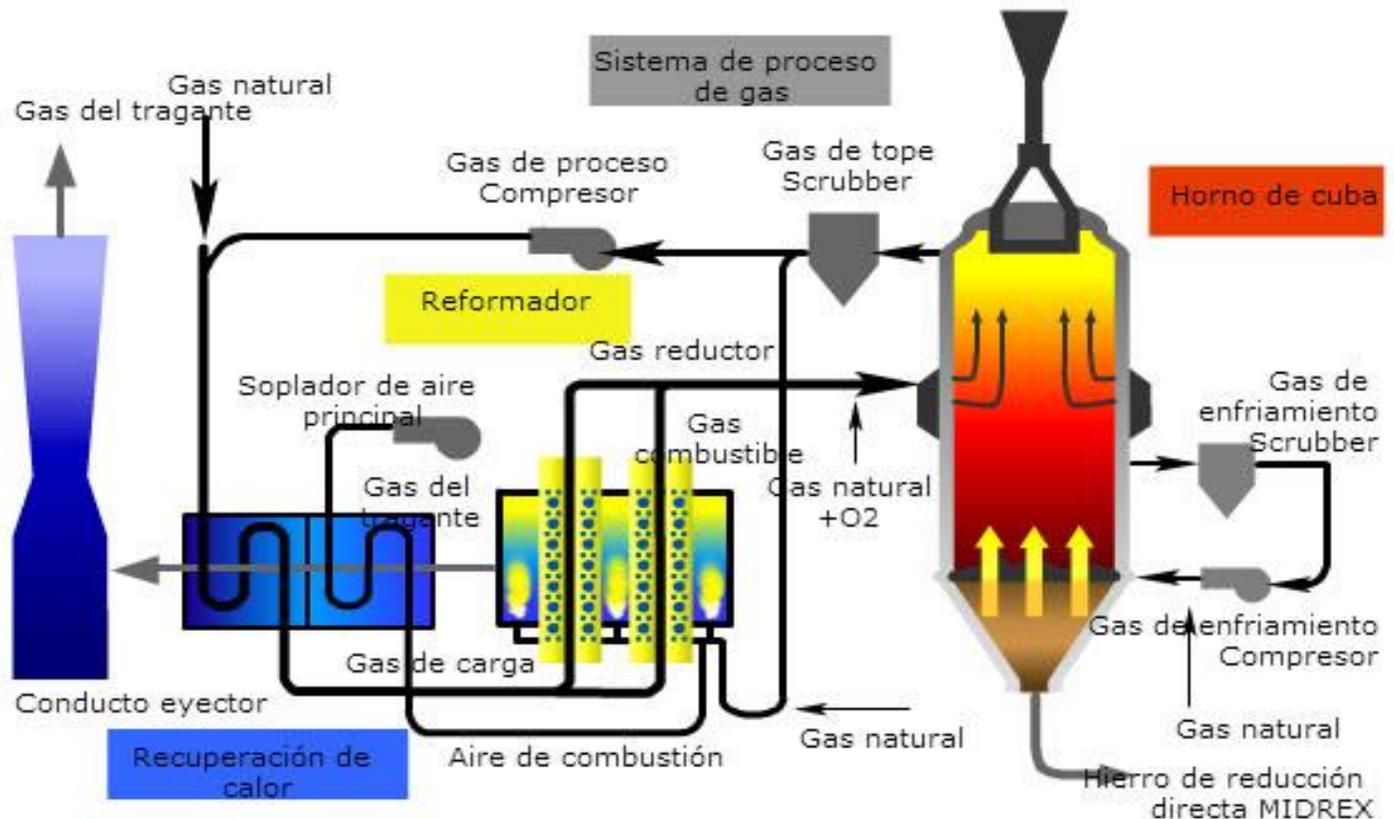
INMETCO

Aproximadamente el 92% del HRD se produce usando gas natural (reformado) como combustible. En una cantidad limitada de plantas, se usa carbón como combustible. Como material de carga, se usa pélets de mineral de hierro y mineral granular en los procesos que utilizan un horno de cuba (MIDREX, HyL), se usa finos y concentrados en los procesos que utilizan un lecho fluidizado (CIRCORED, FINMET, IRON CARBIDE) o un horno de crisol rotativo (FASTMET, INMETCO).

El horno de cuba ha evolucionado y se convirtió en el reactor de reducción para los procesos basados en gas. Funcionan dos procesos principales: MIDREX y HyL III. La unidad de FIOR en Venezuela, pequeña en comparación, usa un lecho fluidizado para la reducción del mineral de hierro. HyL I y HyL II usan reactores por lotes para reducir el mineral de hierro.

Proceso MIDREX

Los procesos de reducción directa basados en gas son particularmente adecuados para las zonas donde el gas natural está disponible en abundancia y a un precio económico. El proceso MIDREX es un proceso de reducción directa en un horno de cuba en el cual los pélets de mineral de hierro, el mineral granular o una combinación se reducen en una cuba vertical (horno de reducción) a hierro metálico por medio de un gas reductor.



PROCESO DE REDUCCION DIRECTA MIDREX.

El horno de reducción es alimentado con pellas y gruesos de mineral de hierro.

Este proceso trabaja al igual que el HYL con el gas reductor, rico en monóxido de carbono e hidrógeno.

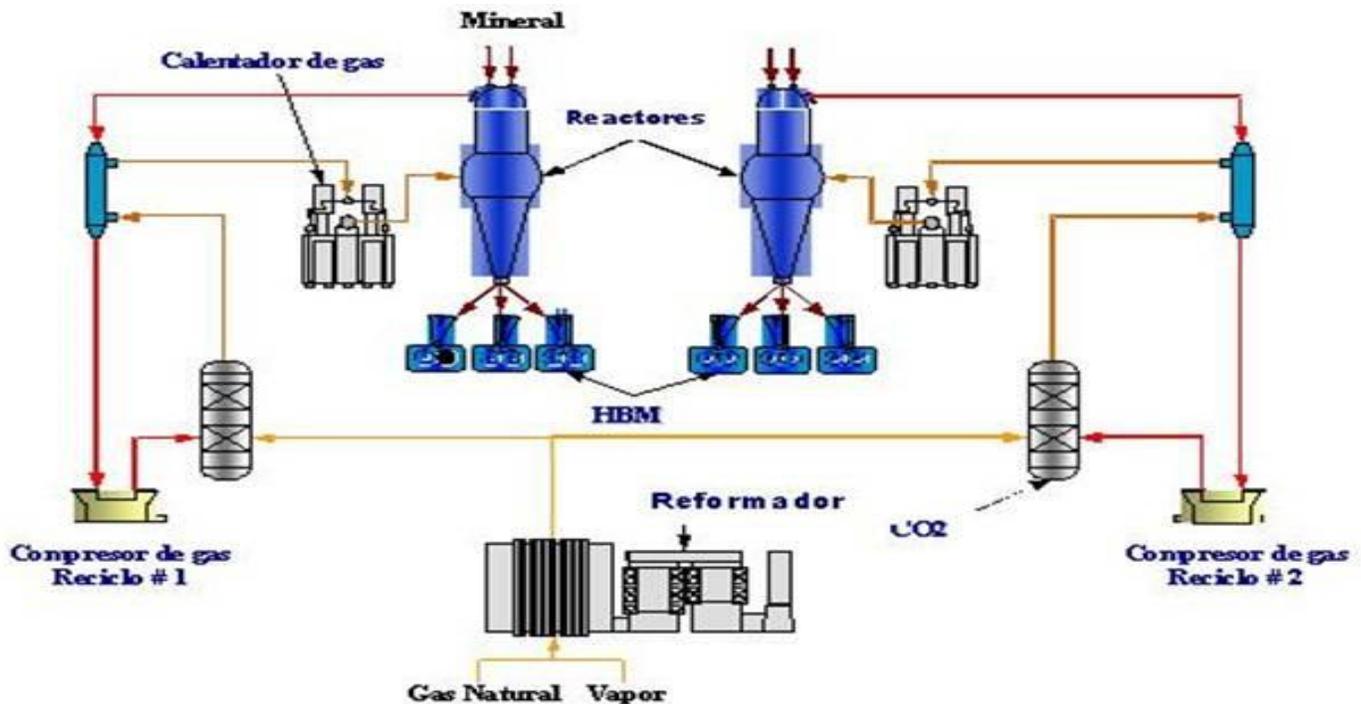
El gas reacciona con el Óxido de Hierro (Fe_2O_3) y le remueve el oxígeno.

Los minerales de hierro contienen del 60 al 70% de hierro; el resto se compone de oxígeno, arena, arcilla y piedras, que a su vez contienen óxido de silicio.

Figura 41. Descripción del proceso de reducción directa de mineral de hierro MIDREX.

Proceso HyL (I, II y III)

El proceso consiste en reducir químicamente la cantidad de oxígeno del hierro, lo que se consigue mezclándolo con hidrógeno (H) y monóxido de carbono (CO) a 800° C. Tanto el hidrógeno, como el monóxido de carbono, sustraen el oxígeno del hierro, es decir, se oxidan, y forman H₂O y CO₂. Durante el proceso, el óxido de hierro Fe₂O₃ se convierte en Fe₃O₄, después en FeO y al terminar el proceso en el elemento Fe. El hierro reducido (o fierro esponja) es poroso, carece de impurezas y resulta fácil de manejar en el proceso de fabricación de acero.



PROCESO DE REDUCCIÓN DIRECTA HYL.

Utiliza una mezcla de gases rica en hidrógeno y monóxido de carbono para extraer el oxígeno del mineral de hierro.

La mezcla de gases se produce a partir de gas natural y vapor de agua en un dispositivo llamado reformador.

A altas temperaturas, y con ayuda de catalizadores que se ponen en el interior de los tubos, ocurre la reacción química:

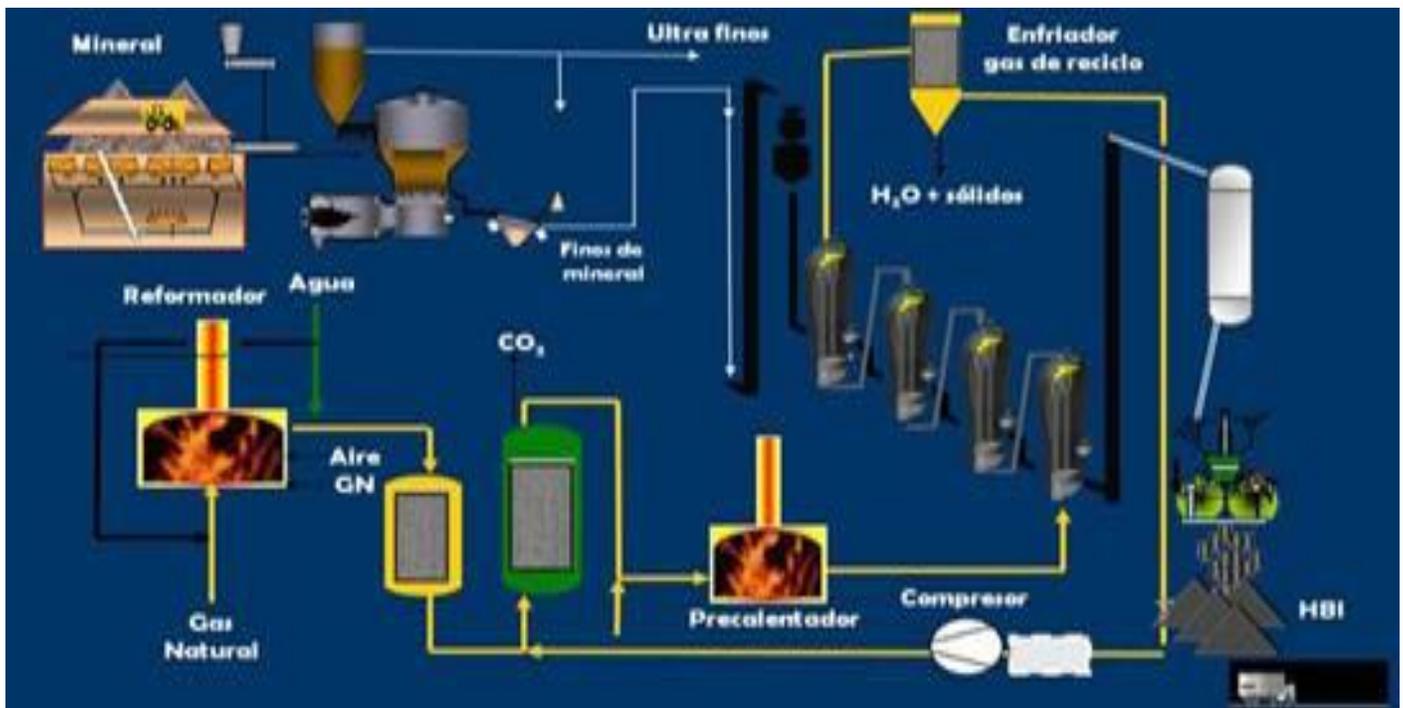


Gas Natural + Vapor de Agua = Hidrógeno + Monóxido de Carbono.

Figura 42. Descripción del proceso de reducción directa de mineral de hierro HyL (I, II y III).

Proceso FIOR

El proceso FIOR (Fluidized Iron Ore Reduction) emplea hornos de lecho fluidizado para reducir partículas de mineral de hierro sin aglomerar. El gas reductor se produce por reformación catalítica del gas natural y este compuesto, en su mayor parte, de hidrógeno. La temperatura de reducción es inferior que la de los procesos descritos previamente, del orden de 800 °C. Esta temperatura es posible debido a una mayor área interfacial sólido-gas con el empleo de finos de mineral y altas presiones. El proceso consta de cuatro reactores en serie, el material fluye por gravedad de uno a otro reactor. En el primero se precalienta el material a 870 °C. El producto se somete generalmente a briqueteado.



PROCESO DE REDUCCION DIRECTA FIOR.

Proceso de reducción de finos de mineral de hierro en lecho fluidizado, para producir briquetas moldeadas en caliente.

El proceso FIOR se basa en la reducción de mineral de hierro a hierro metálico a altas temperatura y presión, utilizando gases reductores.

El gas reductor utilizado, tiene un alto contenido de hidrógeno.

La parte más importante del proceso es el circuito del reactor.

Figura 43. Descripción del proceso de reducción directa de mineral de hierro FIOR.

Proceso FINMET

El proceso FINMET® (Finos metalizados) es un proceso de reducción de mineral de hierro en lecho fluidizado, en el cual el gas utilizado para la reducción, es rico en hidrógeno, H₂, y monóxido de carbono, CO.

Este gas se introduce a la batería de los reactores reductores de lecho fluidizado conectados en serie, donde fluye en contracorriente entrando en contacto con el mineral proveniente de los sistemas de alimentación de mineral.

FINMET® utiliza finos de mineral de hierro en estado natural, en el proceso se elimina el oxígeno del mineral de hierro en estado sólido en cuatro etapas de reducción en lecho fluidizado para obtener un producto con alto contenido de hierro metálico, bajo azufre y residuales, que posteriormente es compactado en forma de briqueta ó HBI (Hot Briquetted Iron), producto de muy alta calidad.

La primera planta que utilizó la tecnología FINMETÒ fue construida por The Broken Hill Proprietary (BHP) en Port Hedland, Australia, y cuyas operaciones se iniciaron en el año 1999; gracias a la asesoría técnica del personal de Operaciones RDI, la segunda planta en emplear la tecnología FINMETÒ fue Orinoco Iron, construida por International Briquettes Holding (IBH) y BHP, en Puerto Ordaz, Venezuela

El proceso FINMET se desarrolla básicamente en cinco áreas: manejo de materiales, reactores, planta de gas, servicios y briqueteadora.

✓ Manejo de Materiales

El manejo de materiales se divide en dos secciones, la primera el manejo de finos de mineral de hierro y la segunda el manejo de briquetas que es en realidad el producto. Manejo de finos de mineral de hierro:

- Se recibe el mineral de hierro suministrado por la empresa FMO, el mineral es transportado por un sistema de correas y según sus características físico-químicas puede ser apilado en patio o alimentado directamente al proceso para su respectiva preparación.
- Preparar el mineral significa adecuarlo para ser utilizado en el proceso de reducción.

Manejo de Briquetas: Las briquetas son el producto final de todo el proceso, el producto es almacenado para luego salir de planta a través del ferrocarril de briquetas, el cual las transporta hasta el puerto de embarque desde donde son enviadas al cliente.

✓ Reactores

En el área de reactores es donde ocurre la reducción del mineral de hierro, aquí se transforma el hierro de su estado natural (óxido férrico) a su estado mineral, extrayéndole todo el oxígeno hasta conseguir Fe^0 (hierro metálico) con una metalización de aproximadamente 92%. Esta área comprende desde el sistema de alimentación hasta el transporte de mineral reducido al tambor de alimentación de la Briqueteadora.

El mineral entra por la pared lateral del reactor superior R40, desde las tolvas de alimentación y fluye por gravedad de un reactor a otro a través de los bajantes, el mineral entra en contacto en contracorriente con el gas reductor, la corriente de gas mantiene los sólidos en estado fluidizado y reacciona con el mineral.

El mineral permanece en el reactor por cierto tiempo, el gas a la presión y temperatura requerida por el proceso es alimentado al reactor inferior R10, fluyendo a la parte superior del mismo para luego abandonar el reactor por el ducto de salida de gases. El gas reductor pasa por los otros tres reactores superiores en serie.

✓ Planta de Gas

Es el área donde se acondiciona el gas natural proveniente del área de servicios y el gas de reciclaje proveniente del área de reactores para generar el gas reductor necesario para el proceso de reducción, el gas reductor es una mezcla con alto contenido de hidrógeno y monóxido de carbono.

Los sistemas asociados para generar el gas reductor son:

- Hidrogenación y Desulfurización
- Reformación.
- Purificación.
- Recalentamiento.

✓ Briqueteadora

En esta área se recibe el hierro reducido y es alimentado hacia la tolva de las máquinas briqueteadoras, donde el mineral se compacta en unos rodillos, originando las briquetas con un valor de densidad establecido.

✓ Servicios

En esta área se recibe y se comprime el gas natural proveniente de PDVSA, se genera, se comprime y se distribuye el gas inerte y el gas de sello, además se trata el agua industrial para los diferentes procesos y por último se genera y comprime el aire de instrumento usado en toda la planta.

Proceso FASTMET

Proceso de reducción directa de mineral de hierro a pelets metálicos de hierro que puedan alimentar a un horno eléctrico con una cantidad equivalente de chatarra. Se ha diseñado este proceso a fin de evitar la ruta horno de coque – alto horno para producir metal caliente a partir de mineral de hierro. Además, es uno de los varios métodos que las acerías podrían utilizar para reducir su dependencia de alimentación de chatarra de alta calidad.

Se ha demostrado que el proceso FASTMET logra una alta metalización y una alta recuperación de Zinc en polvo que recicla el proceso a través del laboratorio pruebas y pruebas en KAKOGAWA, planta de FASTMET comercial.

El proceso FASTMET convierte los desechos de acero, con o sin la suma de finos férricos, en la metalización del hierro en un horno de hogar rotatorio (RHF) se usa el carbono como el reductor. El producto puede ser DRI frío, DRI caliente o HBI; dependiendo de los requisitos de uso.

La mayoría de las siderurgias están buscando maneras apropiadas de reciclar los polvos de laminación, polvos del Horno de desechos, horno básico de oxígeno, horno de arco eléctrico, sinters, balanza del molino, etc.

Hay dos aspectos en el reciclando de polvo de acero:

- Reciclar los recursos valiosos, materiales férricos para la fabricación de acero y el óxido de Zinc crudo a la recuperación de metales no férreos.
- Reducir la polución medioambiental, del punto de vista económico y medioambiental, el proceso de FASTMET es muy atractivo como una tecnología limpia.

El proceso FASTMET convierte los pellets de óxido férrico y/o los desechos de acero de fundición, en hierro metálico, cuando el carbón pulverizado u otro material de carbón se usa como reductor.

En funcionamientos dónde el alimento primario es la mena virgen, los reductores se concentran, son peletizados y secados antes de enviarlos al horno rotatorio RHF. Aquí los materiales se llevan al horno en una sola capa.

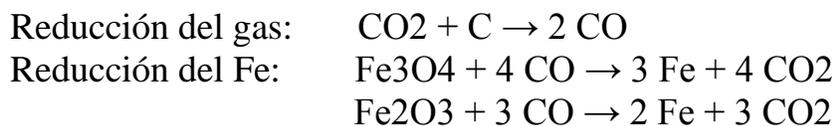
En casos en que los desechos de la fundición de acero son los materiales del alimento primarios, los desechos pueden ser los briqueteados, que proporciona más flexibilidad al utilizarlos, reduce la necesidad de moler los materiales del alimento y elimina la necesidad de secar las bolas verdes.

Como el hogar rueda, los materiales del alimento se calientan de 1250 - 1400 °C, y el óxido férrico se reduce al hierro metálico por acción del CO. Tiempo de la residencia en el hogar es de 6 - 12 min., dependiendo del material a procesarse, el tamaño del alimento, y otros factores. Durante este tiempo, se metaliza de 85% – 95%.

La rápida reducción lograda en el Proceso FASTMET se atribuye a la alta temperatura de la reducción, la alta T° de transferencia, y el contacto íntimo de carbono con el óxido férrico en el alimento.

El gas que deja el horno rotatorio es totalmente el combustible y parcialmente enfriado en el acondicionador de gas, donde se usa la energía termal para precalentar el aire de la combustión para los quemadores del mismo horno. El gas se purifica en un limpiador de SO₂, determinada por las regulaciones medioambientales.

La metalización del DRI puede ajustarse, el carbono en los materiales del alimento también pueden ajustarse para obtener el volumen del carbono necesario, la química del producto variará, dependiendo de la química de la mena, los reductores, y aglomerantes usados. Reacción global de reducción en el proceso FASMET:



BENEFICIOS FASTMET®

Reducción total del costó de eliminación de desechos y obligación del basural.

1. Las pérdidas cambiaron a una fuente de hierro de calidad (DRI). Para ser reciclado en hierro o proceso de fabricación de acero.
2. El grado de Metalización: Hierro: 85-92% Níquel: 95-100%
3. La recuperación de Zinc al 95% o superior, contenido en las basuras. Para ser vendido a un productor de Zinc.
4. El contenido de carbono en los polvos se usará como el reductor. El carbono suficiente en el DRI puede ajustarse según el requisito de cliente

PROBLEMAS ASOCIADOS AL PROCESO

Muchas fundiciones de acero que opera hoy se preocupan por el manejo de basuras. Estas preocupaciones componen anualmente, y la necesidad de la industria siderúrgica es más proactivo hacia encontrar las soluciones. Algunos de estos problemas son:

1. Eliminación de basuras
2. Recuperación de valiosas unidades férricas
3. Control de costos de material crudo
4. Conservación de capital
5. Problemas medioambientales

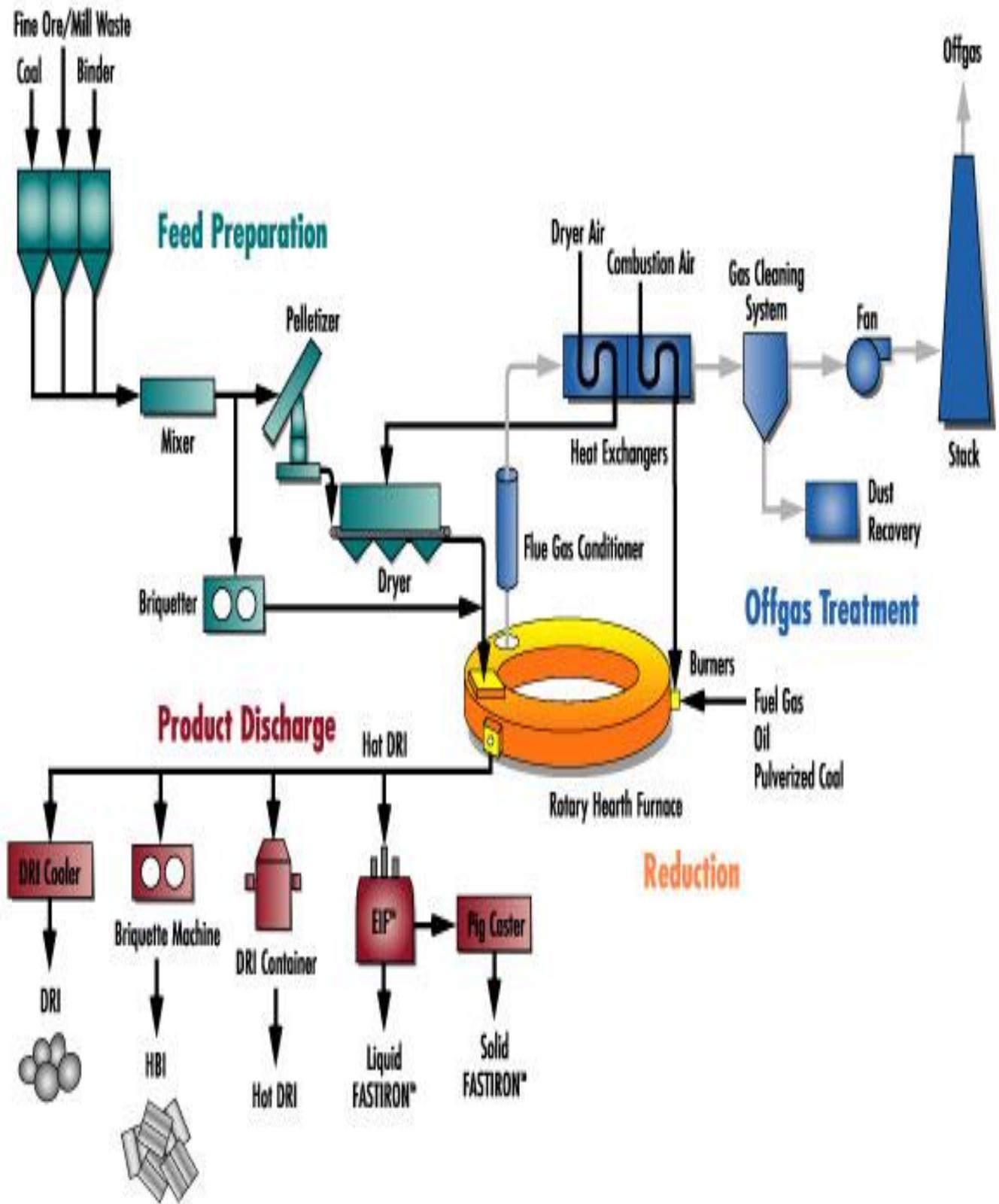


Figura 45. Descripción del proceso de reducción directa de mineral de hierro FASTMET.

Proceso IRON CARBIDE

El proceso IC (Iron Carbide) fue desarrollado, inicialmente, por el sueco Stelling en 1957. En su momento, este proceso tuvo problemas de adherencia de los finos de mineral debido a la formación de óxidos de bajo punto de fusión, combinados con FeO.

En 1977, el norteamericano Stephens propuso una estrategia de control para mejorar el proceso, en el cual los finos de mineral de +0,1 mm -1 mm se precalientan a 700 °C y, posteriormente, se introduce a un reactor de lecho fluidizado, el cual opera a una presión de 1,8 atm y una temperatura de operación de 570 °C.

El gas reactante está compuesto por 60 % CH₄, 34 % H₂, 2 % CO, 1 % H₂O. Este gas de proceso se forma mezclando gas hidrogeno con gas reciclado que ha sido limpiado previamente. La planta piloto de Trinidad y Tobago proyectada para 0,3 mtpa nunca rebasó 0,1 mtpa, desde 1992 a 1999, debido en parte a tiempos de proceso muy prolongados. Qualitech construyo una planta en EE. UU., pero su operación actualmente está suspendida.

Existe una gran diferencia entre los productos obtenidos en los procesos anteriores y el producto obtenido en el proceso IC. En un proceso convencional de reducción directa, el producto es hierro metálico (Fe).

En cambio, en el proceso IC, el producto principal es carburo de hierro (Fe₃C o Fe₅C₂)-La cantidad de carbono en el hierro esponja varia generalmente de 1,5 - 3 % C. En cambio en el carburo de hierro puede variar de 7,7 - 10 % C, dependiendo del tipo de carburo producido, constituyendo una fuente de energía química durante su fusión posterior.

Proceso PUROFER

Este proceso fue desarrollado por el alemán A. Thyssen a finales de los años sesenta. El gas reductor se produce mediante dos reformadores cuyas paredes están impregnadas con catalizador de níquel.

Los reformadores actúan de manera regenerativa, es decir, uno de ellos se calienta a 1400 °C con los gases de salida, mientras que en el otro se introduce el gas natural a reformar.

Debido al efecto enfriante de la reacción de reformación del gas natural, la temperatura disminuye de 1.400 a 1.200 °C, momento en el que el gas reformado se transfiere al segundo reformador para calentarse.

Durante la reformación, el azufre del gas natural se deposita sobre el catalizador, pero durante la siguiente etapa de precalentamiento este elemento es oxidado y eliminado en el gas de salida. Este proceso ya no se comercializa.

Proceso INMETCO

Proceso comercializado por Mannesmann-Demag. El proceso INMETCO emplea carbón no coquizable, finos de mineral y caliza, en un horno giratorio. En su esquema tradicional, los finos de mineral se aglomeran con finos de caliza y carbón. El pelet se carga al horno sin someterse a secado, debido a que no está sujeto a grandes esfuerzos mecánicos dentro del horno y se carga en forma de capas uniformes. En el producto se reportan concentraciones de carbono hasta de 5 %.

Este proceso se desarrolló, inicialmente, para reciclar desechos de plantas metalúrgicas, siendo en la actualidad uno de los procesos más importantes para el reciclado de desechos. Los principales desechos de plantas metalúrgicas son diversos polvos y la cascarilla de laminación.

Los polvos están constituidos por partículas muy pequeñas, generalmente menores a 1µ y su transporte, por medios neumáticos, es simple. La cascarilla puede contener aceite, lo que dificulta su recuperación, requiriendo una limpieza previa. El polvo, en acerías que funden chatarra tiene, generalmente, elevados contenidos de zinc, que junto con el plomo se elimina parcialmente a través de los gases de salida durante la reducción del mineral.

Proceso AREX

El proceso AREX (Auto, REX), desarrollado en 1987 por Dam y Bueno de la empresa SIDOR en Venezuela, fue el primer proceso a escala industrial en implementar la autoreformación catalítica del gas natural, usando el hierro esponja recién reducido como catalizador y empleando un horno MIDREX. La empresa italiana Danieli comercializa actualmente este proceso, con la denominación DANAREX.

Proceso NSC

Este proceso fue desarrollado por Nippon Steel Corporation, siendo similar a los procesos mencionados que emplean hornos verticales. Su característica principal consiste en que el enfriamiento se realiza en un recipiente separado del reactor de reducción. El proceso opera a altas presiones. El proceso no se comercializó, tras fallidos intentos de operar una planta en Malasia.

Proceso CIRCORED

Proceso desarrollado por la empresa Lurgi de Alemania a fines de los años setenta. Es un proceso de reducción de finos de mineral que emplea lechos fluidizados. El proceso tiene dos etapas: en la primera, los finos de mineral se precalientan y en la segunda, se efectúa la reducción en presencia de hidrógeno y a una presión de operación de 4 bar. El tamaño de partícula es de 4 µ.

Proceso SL/RN

Es un procedimiento de reducción directa nacido de la asociación de dos procesos parecidos que han empleado hornos rotatorios y combustible sólido como agente reductor. Se llamaban S.L. y R.N. y el nuevo procedimiento se conoce por eso con el nombre de SL-RN. El proceso SL/RN usa un horno rotatorio inclinado con reductor sólido (finos de coque o carbón) se carga conjuntamente con el mineral en trozos de pellets y caliza.

El RN fue un desarrollo conjunto de la Republic Steel Corp y la National Lead Co y en realidad constituyó el resultado de ensayos efectuados durante más de 14 años, que se iniciaron cuando la filial de la National Lead Co, la Titan Co AIS, de Noruega, efectuó pruebas de reducción del mineral ilmenita en un horno rotatorio, con el objeto de reducirlo a $Fe + TiO_2$ que a continuación se sometía a un enriquecimiento magnético.

El SL, desarrollado por Steel Company of Canadá y Lurgi Gesellehaft, desde un principio se dedicó más a la producción de una esponja de hierro destinada a los hornos de acero usando minerales de alta ley.

El procedimiento corresponde teóricamente a la reducción directa por el carbono sólido. Pero como hemos visto ya, se trata en realidad de una reducción mediante CO y conversión del CO_2 , resultante con el exceso de C, de modo que haya otra vez CO disponible en la reducción gaseosa.

Se trabaja con un exceso de reductor sólido que ayuda a evitar la aglomeración de las partículas del mineral. Este exceso se recupera casi en un 75 %. Parte del CO abandona la carga y se quema en la superficie de ésta, proporcionando parte de las necesidades térmicas del proceso.

El horno es cilíndrico y rotatorio, pero la sección en el extremo de la descarga, es algo menor para aumentar el grado de llenado y mejorar la estabilidad térmica del horno y mantener uniforme las condiciones de operación y sus resultados. La carga viene a ocupar el 20 % del volumen del horno.

Las temperaturas del horno se controlan mediante tubos de entrada de aire que están distribuidos en toda la longitud del horno y provocan la combustión, tanto del óxido de carbono que sale de la carga como de los componentes volátiles del carbón.

Dichos tubos pueden tomar la forma de quemadores de gas o fuel-oil si es necesario. Por ejemplo, para elevar rápidamente la temperatura del horno a la temperatura conveniente de reducción. La orientación de salida de las boquillas de estos tubos o quemadores es una característica del proceso.

En general, en el SL-RN se encuentran dispuestas en la dirección contraria al sentido de movimiento de gases. Pero en la instalación de Nueva Zelanda y en la de Wilbank (Africa del Sur) tienen la misma dirección que el movimiento de gases y lo mismo ocurre en el proceso Krupp, que consideraremos después. Interesa que la temperatura de reducción sea lo más alta posible, pero siempre por debajo del punto de fusión de todos los constituyentes contenidos en la carga.

La característica principal del proceso es que es un proceso versátil que no ofrece tantas limitaciones como otros procesos en cuanto al análisis del mineral o al tipo de combustible sólido, salvo que las cenizas de éste han de tener un punto de fusión superior a 1.2000 C. De todas formas, los minerales de hierro de bajo contenido de ganga y alto contenido de Fe tienen un efecto favorable sobre la calidad de la esponja de hierro. Se señala por ello conveniente un contenido de Fe superior al 65 %.

Las distintas instalaciones de SL-RN funcionando en el mundo están fabricando productos muy diferentes. Por ejemplo, en Suráfrica se destina a la obtención de un producto con un 45 % de reducción, que se funde posteriormente para aprovechamiento de los óxidos de vanadio.

Las materias primas se cargan a base de una mezcla previa del mineral y reductor y también se añade a la mezcla caliza o dolomía para disminuir los contenidos de S, tanto del mineral como del combustible. Son fundamentales la alimentación controlada de la carga y su uniformidad física y química.

La mezcla pasa primero por la zona de secado y precalentamiento del horno antes de entrar en la zona de reducción. Se controla la temperatura del horno, el grado de metalización, la velocidad de descarga, el exceso de combustible, la temperatura del gas de salida y su composición. Asimismo, hay que regular la velocidad del horno y las condiciones de tiro. La temperatura de reducción suele ser de 1.050 a 1.1000 C.

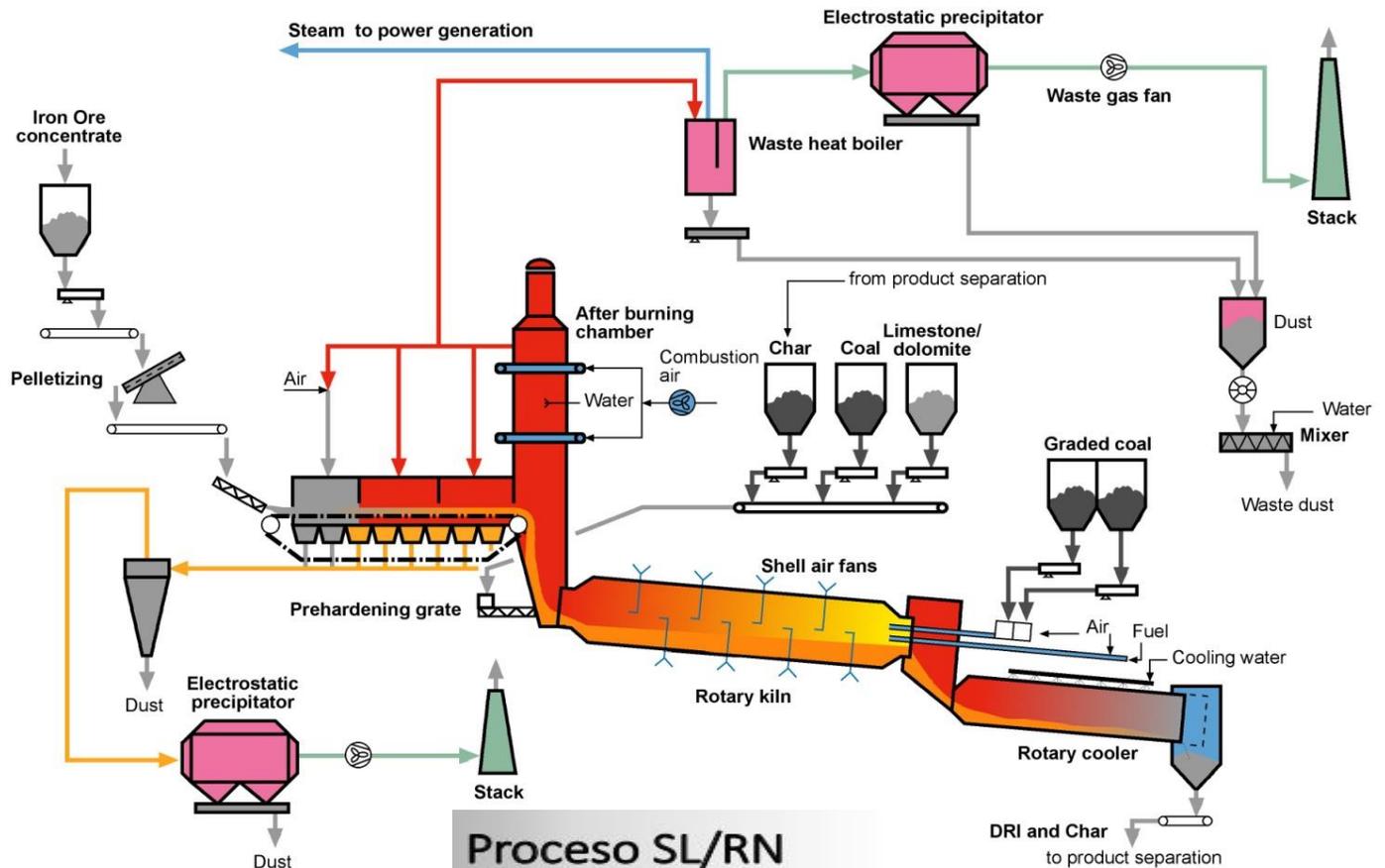
El horno puede estar calentado con carbón pulverizado o fuel-oil o gas, por uno de sus lados, según las necesidades térmicas que dependen de las materias volátiles del reductor empleado.

Por ejemplo, si el carbón, mezclado con el mineral, tiene pocas materias volátiles, caso de las antracitas y finos de coque, se emplean por el lado de salida quemadores de otros combustibles líquidos o gaseosos.

Si, por el contrario, se emplean carbones con muchas materias volátiles, se inyectan éstos por tubos colocados en el lado de salida y orientados para que el desprendimiento de volátiles resulte convenientemente distribuido y el calentamiento con su combustión y con la del CO desprendido sea uniforme.

El producto que sale del horno está compuesto por el mineral reducido, el producto carbonoso en exceso, cal y cenizas. Entonces se somete a una serie de manipulaciones, entre las cuales las más importantes son el enfriamiento inmediato, para prevenir la reoxidación, en un tambor refrigerado con agua, la recuperación de la sustancia carbonosa y la separación de la parte metálica por tamizado, molienda y separación magnética y gravimétrica.

Si se trabaja con pellets, un diseño interesante es disponer el endurecimiento de los pellets verdes en una parrilla dispuesta antes que el horno rotatorio por medio de los gases que escapan a 700° C del horno.



Proceso SL/RN

- Se distingue de los demás por presentar un reductor sólido (carbón no coquizable), consta de dos hornos rotatorios, el primero alcanzando temperaturas de 1100 °C. La carga de mineral de hierro es acompañada de carbón (reductor) y piedra caliza para eliminar el azufre contenido en el carbón reductor. Luego pasa a otro horno rotatorio de enfriamiento. Tiempos de residencia de 10 horas son típicos en este proceso.

Figura 46. Descripción del proceso de reducción directa de mineral de hierro SR/LN

Proceso KRUPP

El nuevo proceso Krupp se ha desarrollado a base de los muchos años de experiencia en la construcción de hornos rotatorios para reducción del mineral de hierro. Esta experiencia ha sido ahora aplicada al tratamiento de minerales de alta ley.

El fundamento del proceso es similar al del proceso que acabamos de considerar. Se emplea un horno rotatorio, en donde se carga mineral junto con un agente reductor sólido y un agente desulfurante.

El horno se calienta desde el extremo de descarga con un defecto de aire y se disponen buzas en la longitud total del horno para soplar aire. Al revés del otro proceso estudiado, el suministro de aire se hace en la dirección de los gases residuales. Se intenta mantener la carga a un perfil de temperatura uniforme entre 950 y 1.050° a lo largo de una buena parte del horno.

Se señala que el proceso puede ser utilizado tanto con mineral calibrado de alta riqueza como con finos concentrados en forma de pellets. En la planta africana de Dunswart, que es donde está montada la única instalación Krupp funcionando, se emplea mineral granulado del país con 67 % de hierro y se carga en tamaños de 5 a 25 mm.

Es importante la composición química del mineral, que no debe tener un contenido de hierro menor de 65 %. También se debe vigilar su granulometría, así como su reductividad. En cuanto al combustible sólido utilizado interesan sus contenidos en materias volátiles, azufre y cenizas, así como el punto de reblandecimiento de estas últimas. Este debe ser, por lo menos, 2000 C superior a la temperatura máxima alcanzada en el horno. En la referida planta de África del Sur se emplean antracita y carbón bituminoso, ambos locales.

El material que se descarga del horno es una mezcla de la esponja de hierro, del exceso de combustible sólido, del agente desulfurante y de las cenizas y sale a una temperatura de cerca de 1.0500. Después de su enfriamiento ha de separarse la esponja de los materiales extraños, obteniéndose un producto de una granulometría análoga al de la carga, excepto los finos que se hayan podido formar. El grado de metalización que han obtenido en la instalación en marcha de Dunswart ha sido de 92 %.

Las materias primas proceden de sus respectivas tolvas de almacenamiento y se pesan en las mismas cintas transportadoras que transportan su mezcla al horno. Hay tamices debajo de la tolva del mineral, para impedir que pasen al horno las partículas inferiores a 5 mm en un porcentaje superior al 5 %.

El carbón bituminoso dispone de una tolva especial y después de su molienda y secado se inyecta en el horno con aire. El horno de Dunswart tiene 73,5 m de largo y un diámetro interior, con refractario, de 4,1 m.

A la salida del horno el producto obtenido pasa a un enfriadero rotatorio, que en la instalación, ya construida, es de 13 m de longitud y 2,5 m de diámetro. Allí se enfría hasta 1500 C, a base de un enfriamiento, tanto directo como indirecto, por agua, lo más rápido posible para evitar la reoxidación.

Las partículas de la esponja de hierro superiores a 5 mm se separan por tamizado y las fracciones menores, por separadores magnéticos. La parte no magnética, de 3 a 5 mm, está constituida por el coque recuperado y las partículas no magnéticas, de 1 a 3 mm, se pasan a un dispositivo neumático para separar el coque de la ceniza y del agente sulfurante.

Estos últimos y todo el material no magnético, de tamaño inferior a un mm, se consideran materiales para la escombrera. El gas caliente, que sale del horno a una temperatura de 800 a 850° C, se somete a una separación del polvo y se enfría a 600° C por chorros de agua y hasta 160° C por un refrigerante tubular pasando finalmente por un sistema de filtros.

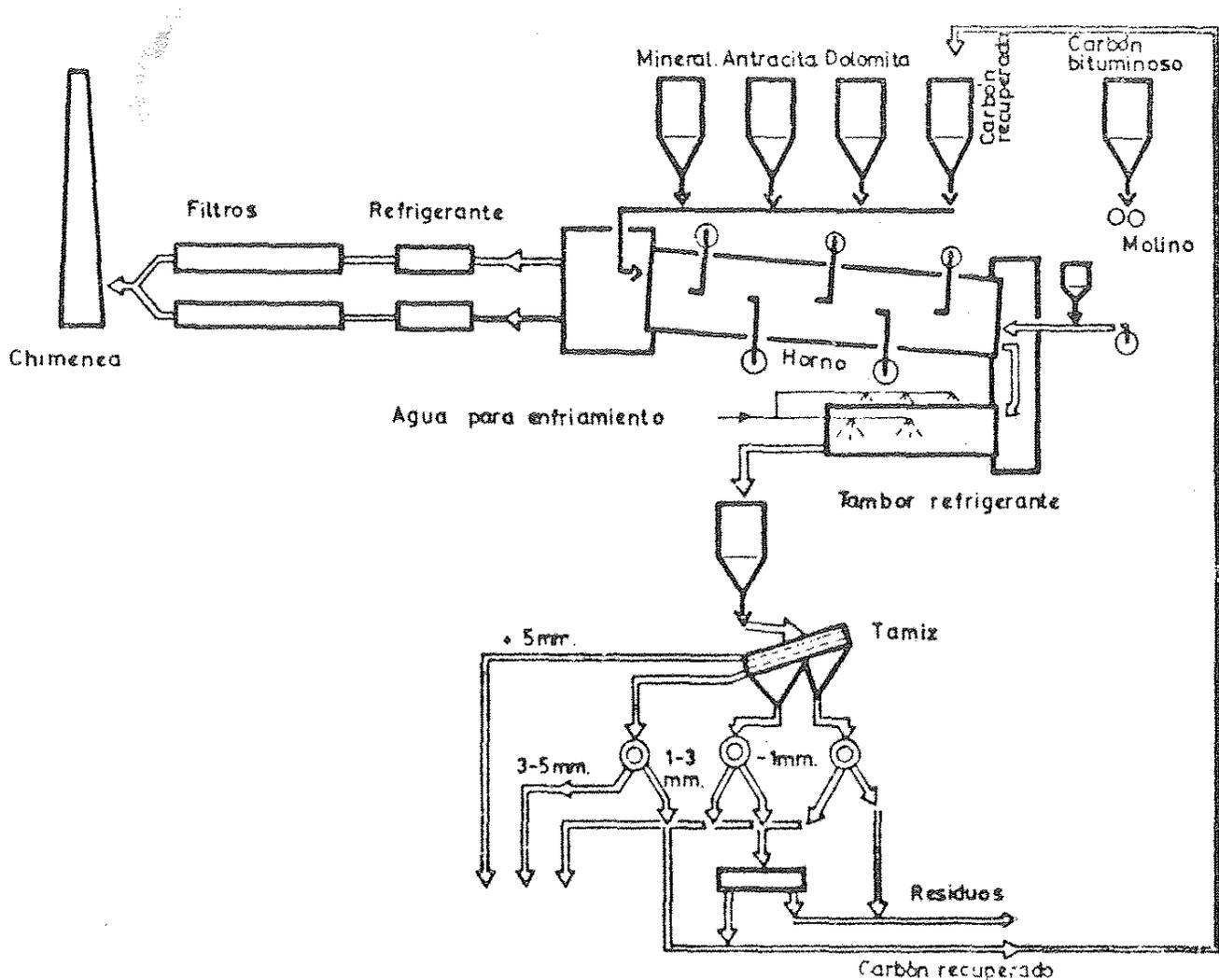


Figura 47. Descripción del nuevo proceso Krupp.

1.4.3. Balance de materia y energía.

El primer paso en el cálculo de un balance de energía es la preparación de un balance de materia suficientemente exacto que considere todos los materiales que entran en las reacciones químicas absorbiendo o liberando cantidades significantes de energía. Considerable cuidado debe de ser puesto aquí, ya que un balance de energía puede ser tan bueno como tan bueno sea el balance de materiales en el cual está basado.

Juicios metalúrgicos buenos son necesarios para ajustar muchos de los conceptos donde información precisa es escasa. La magnitud de los efectos de calor asociados con estas estimaciones mostrará si son suficientemente críticos para que sean necesarias exploraciones futuras. En la figura 48 se enuncia un esquema de un balance energético de la reducción directa de hierro en el proceso SR/LN.

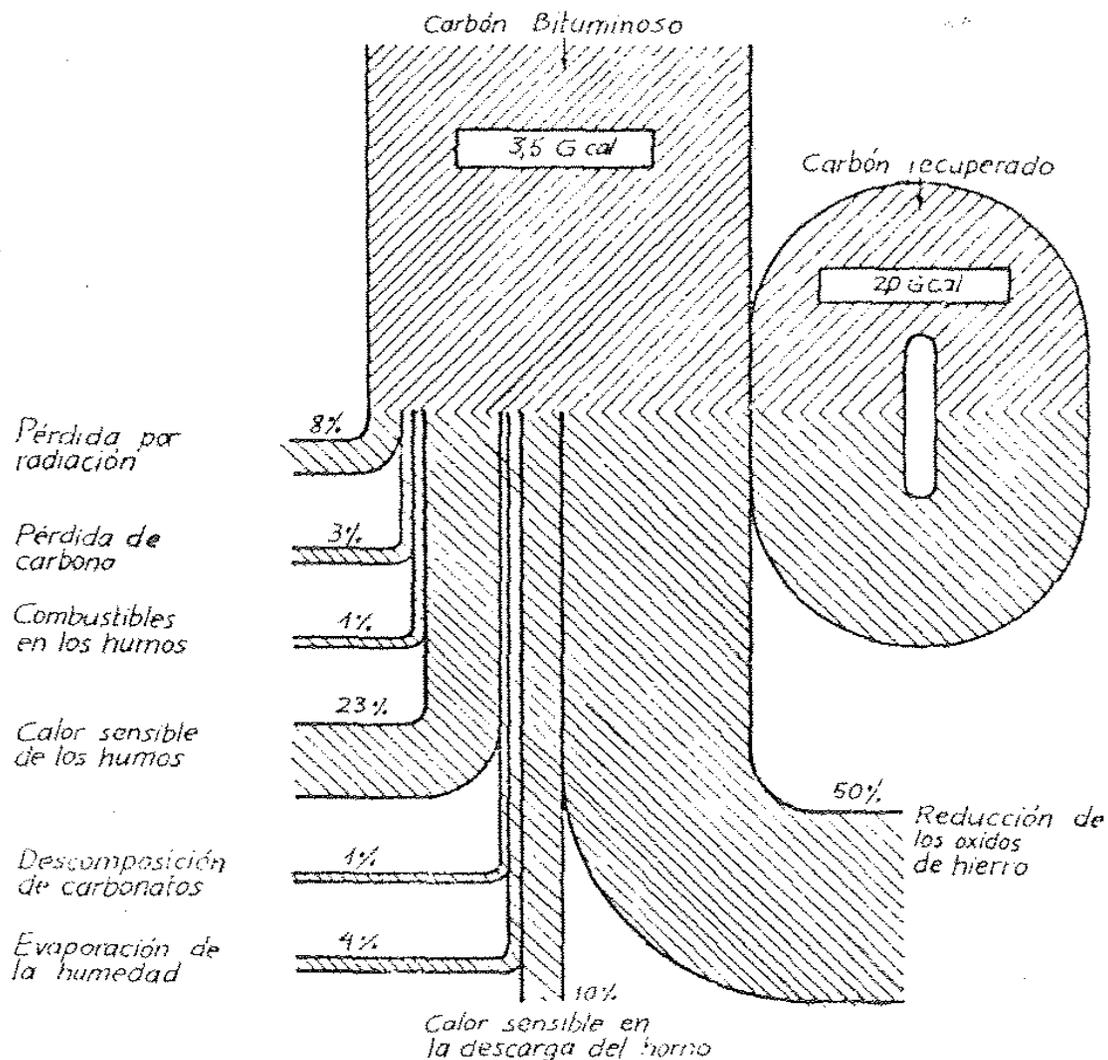
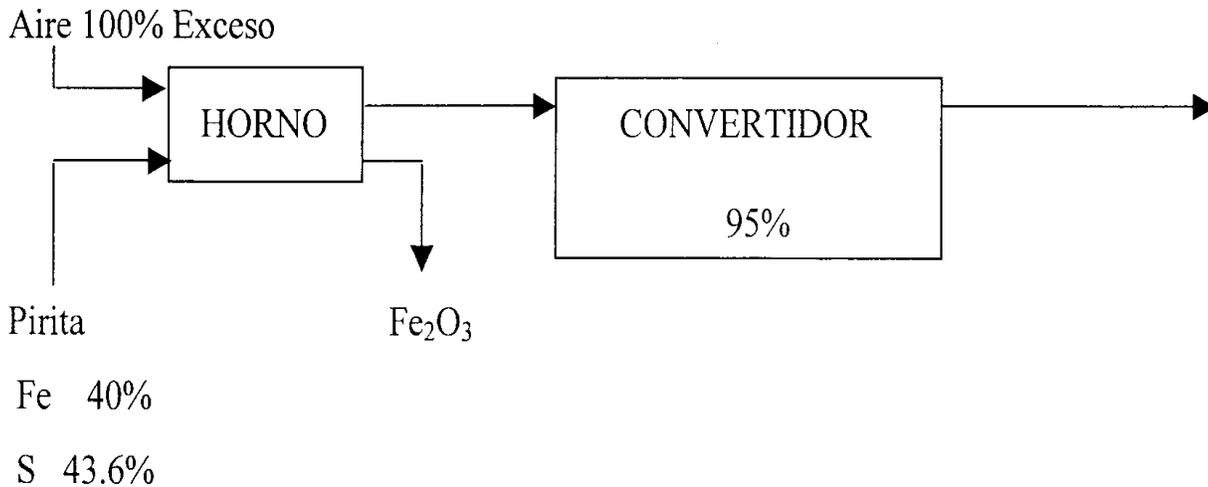


Figura 48. Ejemplo esquemático del balance térmico del proceso SL/RN.

El balance de materia es calculado bajo la reducción del mineral de hierro para transformarlos en acero, que generaran escoria, polvos, y gases de la composición química inicial. Un ejemplo de tal balance de material está dado a continuación. El tratamiento dado aquí es el empleado en forma práctica en la industria siderúrgica el cual se basa en un método sucesivo de aproximaciones. Esto necesita una cierta cantidad de reprocesos para llegar a la solución.

Una pirita de hierro tiene la siguiente composición en peso: Fe 40.0%; S 43.6%; 16.4% material mineral inerte. Esta pirita se quema con un 100% de exceso de aire sobre la cantidad requerida para quemar todo el hierro a Fe_2O_3 y todo el azufre a SO_2 . Supóngase que no se forma nada de SO_3 en el horno. Los gases formados pasan al convertidor, donde se oxida el 95% de SO_2 a SO_3 . Calcular la composición de los gases que entraron y que abandonaron el convertidor.

Planteamiento de la solución:



Reacciones

