

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 962 729**

51 Int. Cl.:

C22B 5/12	(2006.01)
C21B 13/10	(2006.01)
C23C 8/20	(2006.01)
C21B 13/12	(2006.01)
C21B 13/00	(2006.01)
C23C 8/02	(2006.01)
C23C 8/80	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.09.2020 PCT/SE2020/050885**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **01.04.2021 WO21061038**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.09.2020 E 20869030 (5)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **31.01.2024 EP 4034685**

54 Título: **Método y dispositivo para producir metal carburizado de reducción directa**

30 Prioridad:

23.09.2019 SE 1951070

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

27.09.2024

73 Titular/es:

**GREENIRON H2 AB (100.0%)
Box 2376
103 66 Stockholm, SE**

72 Inventor/es:

MURRAY, HANS E.H.

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 962 729 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método y dispositivo para producir metal carburizado de reducción directa

5 La presente invención se refiere a un método y un dispositivo para producir metal carburizado de reducción directa y, en particular hierro de reducción directa, (también conocido como hierro esponja) que también está carburizado. En particular, la presente invención se refiere a la reducción directa de mineral metálico bajo una atmósfera controlada de hidrógeno para producir dicho metal reducido directamente, y al suministro de un gas que contiene carbono como parte del mismo proceso para carburizar el material metálico reducido.

10 La producción de metal de reducción directa utilizando hidrógeno como agente reductor es bien conocida como tal. Por poner un ejemplo, en los documentos SE7406174-8 y SE7406175-5 se describen métodos en los que una carga de mineral metálico se somete a una atmósfera de hidrógeno que fluye a través de la carga, que como resultado se reduce para formar metal de reducción directa. Los documentos de patente US 3 964 898 A y US 5 542 963 A divulgan además un método para la producción de material metálico de reducción directa usando hidrógeno y un gas que contiene carbono.

15 Asimismo, en la solicitud sueca SE 1950403-4, que no ha sido publicado en la fecha de prioridad de la presente solicitud, se divulga un proceso para reducir directamente material metálico bajo una atmósfera cerrada de hidrógeno.

20 La presente invención es particularmente aplicable en el caso de carga y tratamiento por lotes del material a reducir y carburizar.

25 Hay varios problemas con la técnica anterior, incluyendo la eficiencia en cuanto a pérdidas térmicas y el uso de gas hidrógeno. También hay un problema de control, ya que es necesario medir cuando se ha finalizado el proceso de reducción.

30 Asimismo, los métodos conocidos para carburizar material metálico incluyen el uso de monóxido de carbono como fuente de carbono de carburización. Esto conduce a la producción y liberación de dióxido de carbono y, normalmente, también a la producción de monóxido de carbono.

35 Por tanto, sería deseable conseguir un método térmica y energéticamente eficiente para la reducción directa y carburización de material metálico que no conduzca a la liberación a la atmósfera de monóxido de carbono o dióxido de carbono.

La presente invención resuelve los problemas descritos anteriormente.

40 Por tanto, la invención se refiere a un método para producir material metálico reducido directamente, como se divulga en las reivindicaciones adjuntas 1-14.

La invención también se refiere a un sistema para producir material metálico de reducción directa, como se divulga en la reivindicación 15 adjunta.

45 En lo sucesivo, la invención se describirá detalladamente, con referencia a realizaciones de ejemplo de la invención y a los dibujos adjuntos, en donde:

50 la Figura 1a es una sección transversal de un horno simplificado para su uso en un sistema de acuerdo con la presente invención, durante un primer estado de operación;

la Figura 1b es una sección transversal del horno simplificado de la Figura 1a, durante un segundo estado de operación;

la Figura 2 es una vista general esquemática de un sistema de acuerdo con la presente invención;

la Figura 3 es un diagrama de flujo de un método de acuerdo con la presente invención;

55 la Figura 4a es un gráfico esquemático que muestra una posible relación entre la presión parcial de H₂, la presión parcial del gas de carburización y la temperatura en un espacio de horno calentado de acuerdo con una primera realización de la presente invención;

la Figura 4b es un gráfico esquemático que muestra una posible relación entre la presión parcial de H₂, la presión parcial del gas de carburización y la temperatura en un espacio de horno calentado de acuerdo con una segunda realización de la presente invención;

60 la Figura 4c es un gráfico esquemático que muestra una posible relación entre la presión parcial de H₂, la presión parcial del gas de carburización y la temperatura en un espacio de horno calentado de acuerdo con una tercera realización de la presente invención; y

la Figura 5 es un gráfico que muestra la reductividad de H₂ con respecto a un material metálico a reducir, en función de la temperatura.

65 Las figuras 1a y 1b comparten los mismos números de referencia para las mismas piezas.

Por tanto, las figuras 1a y 1b ilustran un horno 100 para producir material metálico reducido directamente y carburizado. En la Figura 2, se ilustran dos de dichos hornos 210, 220. Los hornos 210, 220 pueden ser idénticos al horno 100 o diferir en detalles. Sin embargo, se entiende que todo lo que se dice en el presente documento con respecto al horno 100 es igualmente aplicable a los hornos 210 y/o 220, y viceversa.

5 Asimismo, se entiende que todo lo que se dice en el presente documento con respecto al presente método es igualmente aplicable al presente sistema 200 y/u horno 100; 210, 220 y viceversa.

10 El horno 100 como tal tiene muchas similitudes con los hornos descritos en los documentos SE7406174-8 y SE7406175-5. Sin embargo, una diferencia importante entre estos hornos y el presente horno 100 es que el presente horno 100 no está dispuesto para funcionar de manera que el gas hidrógeno se recircule a través del horno 100 y de regreso a un contenedor colector dispuesto fuera del horno 100, y en particular, no de una manera en la que el gas hidrógeno se recircule fuera del horno 100 (o el espacio 120 del horno calentado) y luego de regreso al horno 100 (o el espacio 120 del horno calentado) durante un mismo procesamiento por lotes del material cargado que se va a reducir.

15 En lugar de ello, en la presente invención reivindicada, y como resultará evidente a partir de la siguiente descripción, el horno 100 está dispuesto para la operación de reducción y carburización por lotes de una carga de material a la vez, y para operar durante dicho procesamiento por lotes individual como un sistema cerrado, en el sentido de que se suministra gas hidrógeno al horno 100 pero no se elimina del mismo durante el proceso de reducción y carburización por lotes; y ese gas que contiene carbono se suministra al horno 100 pero no se elimina del mismo durante el proceso de reducción y carburización por lotes.

20 Esto significa que la cantidad de gas hidrógeno presente dentro del horno 100 siempre aumenta durante el proceso de reducción. Una vez completada la reducción, por supuesto, el gas hidrógeno se evacua desde el interior del horno 100, pero no hay recirculación de gas hidrógeno durante la etapa de reducción. En algunas realizaciones, como quedará claro a continuación, lo mismo se aplica también al gas que contiene carbono.

25 Por tanto, el horno 100 es parte de un sistema cerrado que comprende un espacio de horno calentado 120 que está dispuesto para ser presurizado, como por ejemplo a una presión de más de 1 bar, tal como a una presión de al menos 1,5 bar, o al menos 2 bar, o al menos 3 bar, o al menos 4 bar, o al menos 5 bar, o incluso al menos 6 bar. De todas formas, el espacio de horno 120 está construido para soportar las presiones operativas descritas en el presente documento. Una parte superior 110 del horno 100 tiene forma de campana. Puede abrirse para cargar el material a procesar y puede cerrarse de forma estanca al gas mediante medios de fijación 111. El espacio de horno 120 está encapsulado con material refractario, tal como material de ladrillo 130.

30 Si no se dice nada más, el término "presión" en el presente documento se refiere a una presión total de gas, en particular dentro del espacio de horno 120, en contraste con una "presión parcial" que se refiere a la presión parcial de un gas en particular.

35 Asimismo, dado que la presión atmosférica es de aproximadamente 1 bar, se pretende que las expresiones "presión superior a 1 bar" y "presión superior a la presión atmosférica" tengan el mismo significado. De manera correspondiente, se pretende que las expresiones "presión inferior a 1 bar" y "presión inferior a la presión atmosférica" tengan el mismo significado.

40 El espacio de horno 120 está dispuesto para calentarse usando uno o varios elementos calefactores 121. Preferentemente, los elementos calefactores 121 son elementos calefactores eléctricos. Sin embargo, también se pueden utilizar tubos de combustión del radiador o elementos similares calentados por combustible. Los elementos calefactores 121, sin embargo, no producen cualquier gas de combustión que interactúe directamente químicamente con el espacio de horno 120, que deben mantenerse controlados químicamente para los presentes fines. Se prefiere que la única materia gaseosa proporcionada al espacio de horno durante el proceso de calentamiento principal que se describe a continuación sea gas hidrógeno y cualquier gas que contenga carbono utilizado como fuente de carbono para carburizar el material metálico.

45 Los elementos calefactores 121 pueden estar hechos preferentemente de un material metálico resistente al calor, tal como una aleación de molibdeno.

50 También se pueden disponer elementos calefactores adicionales en el espacio 120 del horno calentado. Por poner un ejemplo, se pueden proporcionar elementos calefactores similares a los elementos 121 en las paredes laterales del espacio 120 del horno, tal como a una altura correspondiente al material cargado o al menos al contenedor 140. Estos elementos calefactores pueden ayudar a calentar no sólo el gas, sino también el material cargado mediante radiación térmica.

55 El horno 100 también comprende una parte inferior 150, que forma un contenedor sellado junto con la parte superior 110 cuando el horno se cierra usando medios de sujeción 111.

Un contenedor 140 para el material a procesar (reducido y carburizado) está presente en la parte inferior 150 del horno 100. El contenedor 140 puede estar soportado sobre un suelo refractario del espacio de horno 120 de manera que permita que el gas pase por debajo del contenedor 140, tal como a lo largo de canales abiertos o cerrados 172 formados en dicho suelo, pasando dichos canales 172 desde una entrada 171 para gas hidrógeno y gas que contiene carbono, tal como desde una parte central del espacio de horno 120 en dicho suelo del horno, radialmente hacia afuera hasta una periferia radial del espacio de horno 120 y posteriormente hacia arriba hasta una parte superior del espacio de horno 120. Véanse las flechas de flujo indicadas en la Figura 1a para estos flujos durante la etapa inicial y la etapa principal de reducción y carburización que se describen a continuación.

El contenedor 140 es preferentemente de constitución abierta, lo que significa que el gas puede pasar libremente a través de al menos un fondo/suelo del contenedor 140. Esto puede lograrse, por poner un ejemplo, formando agujeros a través del fondo del contenedor 140.

El material a procesar comprende un óxido metálico, preferentemente un óxido de hierro tal como Fe_2O_3 y/o Fe_3O_4 . El material puede ser granular, tal como en forma de gránulos o bolas. Un material adecuado para la reducción de lotes son las bolas de mineral de hierro laminadas, que se han enrollado en agua hasta formar una bola con un diámetro de aproximadamente 1-1,5 cm. Si dicho mineral de hierro contiene además óxidos que se evaporan a temperaturas inferiores a la temperatura final del material cargado en el presente método, dichos óxidos pueden condensarse en el condensador 160 y recogerse fácilmente en forma de polvo. Dichos óxidos pueden comprender óxidos metálicos tales como óxidos de Zn y Pb.

Ventajosamente, el espacio de horno 120 no está cargado con cantidades muy grandes de material a reducir. Cada horno 100 se carga preferentemente con como máximo 50 toneladas, como máximo 25 toneladas, tal como entre 5 y 10 toneladas, en cada lote. Esta carga puede mantenerse en un único contenedor 150 dentro del espacio de horno 120. Dependiendo de los requisitos de rendimiento, se pueden usar varios hornos 100 en paralelo, y el calor residual de un lote en un horno 220 se puede usar luego para precalentar otro horno 210 (véase la Figura 2 y más abajo).

Esto proporciona un sistema 200 que es adecuado para instalación y uso directamente en el sitio minero, no requiere transporte costoso del mineral antes de la reducción. En lugar de ello, se puede producir material metálico reducido directamente y carburizado en el sitio, envasado bajo atmósfera protectora y transportado a un sitio diferente para su posterior procesamiento.

Por tanto, en el caso de bolas de mineral de hierro laminadas en agua, se prevé que el horno 100 pueda instalarse en conexión con el sistema de producción de bolas de mineral de hierro, de modo que la carga del material metálico en el horno 100 en el contenedor 140 pueda tener lugar de manera totalmente automática, donde los contenedores 140 circulan automáticamente desde el sistema de producción de bolas de mineral de hierro al sistema 100 y viceversa, se llenan de bolas de mineral de hierro para reducir las y carburizarlas; se insertan en el espacio de horno 120; se someten al procesamiento de reducción y carburización de hidrógeno/calor/gas que contiene carbono descrito en el presente documento; se retiran del espacio de horno 120 y se vacían; se devuelven al sistema de producción de bolas de mineral de hierro; se recargan; y así sucesivamente. Se pueden usar más contenedores 140 que hornos 100, de modo que en cada cambio de lote una carga reducida y carburizada en un contenedor particular se reemplaza inmediatamente en el horno 100 con un contenedor diferente que lleva material aún no reducido ni carburizado. Un sistema tan grande, tal como en un sitio minero, se puede implementar para que esté completamente automatizado y también para que sea muy flexible en términos de rendimiento, utilizando varios hornos más pequeños 100 en lugar de un horno muy grande.

Debajo del contenedor 140, el horno 100 comprende un intercambiador de calor 160 de tipo gas-gas, que puede ser ventajosamente un intercambiador de calor de tubos tal como el ya conocido en sí. El intercambiador de calor 160 es preferentemente un intercambiador de calor de tipo contraflujo. Al intercambiador de calor 160, debajo del intercambiador de calor 160, está conectada una cubeta 161 cerrada para recoger y acomodar agua condensada del intercambiador de calor 160. La cubeta 161 también está construida para soportar las presiones operativas del espacio de horno 120 de manera estanca al gas.

El intercambiador de calor 160 está conectado al espacio de horno 120, preferentemente de modo que los gases fríos/enfriados que llegan al espacio 120 del horno pasen por el intercambiador de calor 160 a lo largo de tubos intercambiadores de calor proporcionados externa/periféricamente y además a través de dichos canales 172 hasta el elemento calefactor 121. A continuación, los gases calentados que salen del espacio de horno 120, después de pasar y calentar el material cargado (véase más adelante), pasan el intercambiador de calor 160 a través de tubos intercambiadores de calor proporcionados internamente/centralmente, calentando así dichos gases fríos/enfriados. Por lo tanto, los gases salientes calientan los gases entrantes mediante transferencia térmica debido a la diferencia de temperatura entre los dos, así como por el calor de condensación del vapor de agua contenido en los gases salientes, que calienta eficazmente los gases entrantes.

El agua condensada formada a partir de los gases salientes se recoge en la cubeta 161.

El horno 100 puede comprender un conjunto de sensores de temperatura y/o presión en la cubeta 161 (122); en la

parte inferior del espacio de horno 120, tal como debajo del contenedor 140 (123) y/o en la parte superior del espacio de horno 120 (124). Estos sensores pueden ser utilizados por la unidad de control 201 para controlar el proceso de reducción y carburización, como se describirá a continuación.

5 171 indica un conducto de entrada para gas de calefacción/refrigeración. 173 indica un conducto de salida para gas refrigerante usado.

10 Entre la cubeta 161 y el conducto de entrada 171 puede haber un canal de equilibrio de sobrepresión 162, con una válvula 163. En caso de una diferencia de presión predeterminada, tal como una diferencia de presión de al menos 1 bar, se acumula en la cubeta 161, debido a grandes cantidades de agua que fluyen hacia la cubeta 161, dicha diferencia de presión puede entonces igualarse parcial o completamente mediante la liberación de gas al conducto de entrada 171. La válvula 163 puede ser una válvula de sobrepresión simple, dispuesta para abrirse cuando la presión en la cubeta 161 es mayor que dicha diferencia de presión predeterminada en relación con la presión en el conducto 171. Como alternativa, la válvula puede ser operada por el dispositivo de control 201 (abajo) basándose en una medición del sensor de presión 122.

20 El agua condensada puede conducirse desde el condensador/intercambiador de calor 160 hacia la cubeta a través de un pico 164 o similar, desembocando en el fondo de la cubeta 161, tal como en un punto bajo local 165 de la cubeta, preferentemente de modo que un orificio de dicho pico 164 esté dispuesto completamente debajo de un fondo principal 166 de la cubeta 161 tal como se ilustra en la Figura 1a. Esto disminuirá la turbulencia del agua líquida en la cubeta 161, proporcionando condiciones de operación más controlables.

25 Ventajosamente, la cubeta 161 está dimensionada para poder recibir y acomodar toda el agua formada durante la reducción del material cargado. Por tanto, el tamaño de la cubeta 161 puede adaptarse al tipo y volumen de un lote de material reducido. Por poner un ejemplo, al reducir completamente y 1000 kg de Fe_3O_4 , como resultado se forman 310 litros de agua y, cuando se reduce por completo, 1000 kg de Fe_2O_3 se forman como resultado 338 litros de agua.

30 En la Figura 2, se ilustra un sistema 200 en el que se puede utilizar un horno del tipo ilustrado en las Figuras 1a y 1b. En particular, uno o ambos hornos 210 y 220 pueden ser del tipo ilustrado en las Figuras 1a y 1b, o al menos de acuerdo con la presente reivindicación 1.

35 230 indica un intercambiador de calor de tipo gas-gas. 240 indica un intercambiador de calor de tipo gas-agua. 250 indica un ventilador. 260 indica una bomba de vacío. 270 indica un compresor. 280 indica un contenedor para gas hidrógeno usado. 290 indica un contenedor para gas hidrógeno fresco/sin usar. 310 indica un contenedor para gas que contiene carbono fresco/sin usar. 320 indica un contenedor para gas usado que contiene carbono, tal como una mezcla de gas del tipo almacenado en el contenedor 310 y gas hidrógeno. V1-V19 indican válvulas.

40 201 indica un dispositivo de control, que está conectado a los sensores 122, 123, 124 y a las válvulas V1-V19, y que generalmente está dispuesto para controlar los procesos descritos en el presente documento. El dispositivo de control 201 también puede estar conectado a un dispositivo de control de usuario, tal como una interfaz gráfica de usuario presentada por un ordenador (no mostrado) a un usuario del sistema 200 para supervisión y control adicional.

45 La Figura 3 ilustra un método de acuerdo con la presente invención, método que utiliza un sistema 100 del tipo generalmente ilustrado en la Figura 3 y en particular un horno 100 del tipo generalmente ilustrado en las Figuras 1a y 1b. En particular, el método es para producir material metálico reducido directamente y carburizado usando gas hidrógeno como agente reductor y un gas que contiene carbono como fuente de carbono de carburización.

50 Después de dicha reducción directa y carburización, el material metálico puede formar metal esponjoso carburizado. En particular, el material metálico puede ser material de óxido de hierro, y el producto resultante después de la reducción directa puede ser entonces hierro esponjoso carburizado. El material metálico carburizado y reducido resultante se puede utilizar luego, en etapas posteriores del método, para producir acero y otros.

En una primera etapa, el método comienza.

55 En una etapa posterior, el material metálico a reducir se carga en el espacio de horno 120. Esta carga puede tener lugar colocando un contenedor cargado 140 en el espacio de horno 120 en la orientación ilustrada en las Figuras 1a y 1b, y el espacio de horno 120 puede entonces cerrarse y sellarse de manera hermética al gas usando medios de sujeción 111.

60 En una etapa posterior, se evacua una atmósfera existente del espacio de horno 120, de modo que se consiga una presión de gas de menos de 1 bar dentro del espacio de horno 120. Se observa que esta presión de gas más baja es menor que la presión atmosférica. Esto puede tener lugar cerrando las válvulas 1-8, 11 y 13-19 y abriendo las válvulas 9-10 y 12, y la bomba de vacío succionando y por lo tanto evacuando la atmósfera contenida dentro del espacio 120 del horno a través del conducto que pasa por 240 y 250. La válvula 9 puede entonces abrirse para permitir que dichos gases evacuados fluyan hacia la atmósfera circundante, en caso de que el espacio de horno 120 esté lleno de aire. Si el espacio de horno 120 está lleno de hidrógeno usado y/o gas que contiene carbono, en cambio, este se evacua al

contenedor 280 o 320, según sea el caso.

En este ejemplo, la atmósfera del horno se evacua a través del conducto 173, incluso si se comprende que se puede utilizar cualquier otro conducto de salida adecuado dispuesto en el horno 100.

5 En esta etapa de evacuación, así como en otras etapas como se describe a continuación, el dispositivo de control 201 puede usarse para controlar la presión en el espacio de horno 120, tal como basado en lecturas de los sensores de presión 122, 123 y/o 124.

10 El vaciado podrá realizarse hasta que una presión máxima de 0,5 bar, preferentemente como máximo 0,3 bar, se alcanza en el espacio de horno 120.

15 En una etapa de calentamiento inicial posterior, se proporciona calor y gas hidrógeno al espacio de horno 120. El gas hidrógeno puede suministrarse desde los contenedores 280 y/o 290. Dado que el horno 100 está cerrado, como se ha mencionado anteriormente, sustancialmente nada del gas hidrógeno proporcionado escapará durante el proceso. Dicho de otra manera, las pérdidas de gas hidrógeno (aparte del hidrógeno consumido en la reacción de reducción) serán muy bajas o incluso inexistentes. En lugar de ello, sólo se utilizará el hidrógeno consumido químicamente en la reacción de reducción durante el proceso de reducción. Adicionalmente, el único gas hidrógeno que se requiere durante el proceso de reducción es la cantidad necesaria para mantener la presión necesaria y el equilibrio químico entre el gas hidrógeno y el vapor de agua durante el proceso de reducción.

20 Como se ha mencionado anteriormente, el contenedor 290 contiene gas hidrógeno fresco (sin usar), mientras que el contenedor 280 contiene gas hidrógeno que ya se ha utilizado en una o varias etapas de reducción y desde entonces se ha recogido en el sistema 200. La primera vez que se realiza el proceso de reducción, sólo se utiliza gas hidrógeno fresco, proporcionado desde el contenedor 290. Durante los procesos de reducción posteriores, se usa gas hidrógeno reutilizado, del contenedor 280 (o 320, véase más adelante), que se completa con gas hidrógeno fresco del contenedor 290 según las necesidades.

25 Durante una fase inicial opcional de la etapa de calentamiento inicial, cuya fase inicial es la de introducción de gas hidrógeno, realizada sin ningún suministro de calor hasta una presión del espacio de horno 120 de aproximadamente 2 bar, las válvulas 2, 4-9, 11 y 13-19 están cerradas, mientras que las válvulas 10 y 12 están abiertas. Dependiendo de si se va a utilizar gas hidrógeno fresco o reutilizado, se abre la válvula V1 y/o V3.

30 A medida que la presión dentro del espacio de horno 120 alcanza, o se acerca a, la presión atmosférica (aproximadamente 1 bar), se enciende el elemento calefactor 121. Preferentemente, es el elemento calefactor 121 el que proporciona dicho calor al espacio de horno 120, calentando el gas hidrógeno suministrado, que a su vez calienta el material en el contenedor 140. Preferentemente, el elemento calefactor 121 está dispuesto en un lugar por el cual fluye el gas que contiene hidrógeno/carbono que se proporciona al espacio de horno 120, de modo que el elemento calefactor 121 quede sustancialmente sumergido en (completamente o sustancialmente completamente rodeado por) gas que contiene hidrógeno/carbono recién proporcionado durante el proceso de reducción y carburización. Dicho de otra manera, ventajosamente, el calor puede proporcionarse directamente al gas hidrógeno y/o directamente al gas que contiene carbono, según lo que se proporcione simultáneamente (en dichas etapas iniciales o finales) al espacio de horno 120. En las Figuras 1a y 1b, se muestra el caso preferido en el que el elemento calefactor 121 está dispuesto en una parte superior del espacio de horno 120.

35 Sin embargo, el presente inventor prevé que el calor pueda proporcionarse de otras maneras al espacio de horno 120, tal como directamente a la mezcla de gases dentro del espacio de horno 120 en una ubicación distante de donde el gas que contiene hidrógeno/carbono proporcionado ingresa al espacio de horno 120. En otros ejemplos, el calor puede proporcionarse al gas que contiene hidrógeno/carbono proporcionado como una ubicación externa al espacio 120 del horno, antes de que se permita que el gas que contiene hidrógeno/carbono así calentado entre en el espacio de horno 120.

40 Durante el resto de dicha etapa de calentamiento inicial, las válvulas 5 y 7-19 están cerradas, mientras que las válvulas 1-4 y 6 son controladas por el dispositivo de control, junto con el compresor 270, para lograr un suministro controlado de gas hidrógeno reutilizado y/o fresco como se describe a continuación.

45 Por tanto, durante esta etapa de calentamiento inicial, el dispositivo de control 201 está dispuesto para controlar los medios de suministro de calor e hidrógeno 121, 280, 290 para proporcionar calor y gas hidrógeno al espacio de horno 120 de manera que el gas hidrógeno calentado caliente el material metálico cargado a una temperatura superior a la temperatura de ebullición de agua contenida en el material metálico. Como resultado, dicha agua contenida se evapora.

50 Durante la etapa de calentamiento inicial y la etapa principal de reducción y carburización (véase más adelante), se suministra gas hidrógeno lentamente bajo el control del dispositivo de control 201. Como resultado, habrá un flujo continuo, relativamente lento pero constante, de gas hidrógeno, verticalmente hacia abajo, a través del material cargado. En general, el dispositivo de control está dispuesto para añadir continuamente gas hidrógeno para mantener

una curva de presión parcial de hidrógeno creciente deseada (tal como creciente monótonamente) (y también una curva de presión total) dentro del espacio de horno 120, y en particular para contrarrestar la presión disminuida en las partes inferiores del espacio de horno 120 (y en las partes inferiores del intercambiador de calor 160) resultantes de la condensación constante de vapor de agua en el intercambiador de calor 160 (véase más adelante). El consumo total de energía depende de la eficiencia del intercambiador de calor 160 y, en particular, de su capacidad para transferir energía térmica al gas hidrógeno entrante tanto del gas caliente que fluye a través del intercambiador de calor 160 como del calor de condensación del vapor de agua que se condensa. En el caso ilustrativo del Fe_2O_3 , la energía teórica necesaria para calentar el óxido, compensa térmicamente la reacción endotérmica y de reducir el óxido es de aproximadamente 250 kWh por 1000 kg de Fe_2O_3 . Para el Fe_3O_4 , la cifra correspondiente es de aproximadamente 260 kWh por 1000 kg de Fe_3O_4 .

Un aspecto importante de la presente invención es que no hay recirculación de gas hidrógeno durante el proceso de reducción. Esto se ha discutido a nivel general anteriormente, pero en el ejemplo que se muestra en la Figura 1a esto significa que se suministra gas hidrógeno, tal como a través del compresor 270, a través del conducto de entrada 171 hacia la parte superior del espacio de horno 121, donde es calentado por el elemento calefactor 121 y luego pasa lentamente hacia abajo, pasado el material metálico a reducir en el contenedor 140, más abajo a través del intercambiador de calor 130 y dentro de la cubeta 161. Sin embargo, no hay orificios de salida disponibles desde el espacio de horno 120, y en particular no desde la cubeta 161. El conducto 173 se cierra, por ejemplo cerrando las válvulas V10, V12, V13, V14. Por tanto, el gas hidrógeno suministrado se consumirá en parte en el proceso de reducción y en parte dará como resultado un aumento de la presión del gas en el espacio de horno 120. Este proceso continúa hasta que se haya producido una reducción total o deseada del material metálico, como se detallará a continuación.

Por tanto, el gas hidrógeno calentado presente en el espacio de horno 120 encima del material cargado en el contenedor 140, a través del lento suministro de gas hidrógeno formando una corriente de gas que se mueve lentamente hacia abajo, desciende hasta el material cargado. Allí, formará una mezcla de gases con vapor de agua del material cargado y cualquier gas que contenga carbono añadido hasta ahora (véase más adelante).

La mezcla de gas caliente resultante formará una corriente de gas hacia el interior y a través del intercambiador de calor 160. En el intercambiador de calor 160, habrá entonces un intercambio de calor desde el gas caliente que llega desde el espacio de horno 120 hasta el gas frío que contiene hidrógeno/carbono recién proporcionado que llega desde el conducto 171, por lo que este último será precalentado por el primero. Dicho de otra manera, el gas hidrógeno que se proporcionará en la etapa inicial, y también el gas que contiene hidrógeno y/o carbono proporcionado en la etapa principal de reducción y carburización (y/o la etapa de suministro de carbono, véase más adelante), se precalienta en el intercambiador de calor 160.

Debido al enfriamiento del flujo de gas caliente, el vapor de agua contenido en el gas enfriado se condensará. Esta condensación da como resultado agua líquida, que se recoge en la cubeta 161, pero también produce calor de condensación. Se prefiere que el intercambiador de calor 160 esté dispuesto además para transferir dicha energía térmica de condensación desde el agua condensada al gas frío que contiene hidrógeno/carbono que se proporcionará en el espacio de horno 120.

La condensación del vapor de agua contenido también disminuirá la presión del gas caliente que fluye hacia abajo desde el espacio 120 del horno, proporcionando espacio para que pase más gas caliente hacia abajo a través del intercambiador de calor 160.

Debido al lento suministro de gas hidrógeno calentado adicional y a la conductividad térmica relativamente alta del gas hidrógeno, el material cargado, en un tiempo relativamente rápido, tal como en 10 minutos o menos, alcanzará el punto de ebullición del agua líquida contenida en el material cargado, para entonces debería estar ligeramente por encima de los 100 °C. Como resultado, el agua líquida contenida se evaporará, formando vapor de agua mezclándose con el gas hidrógeno caliente.

La condensación del vapor de agua en el intercambiador de calor 160 disminuirá la presión parcial del gas para el vapor de agua en el extremo inferior de la estructura, haciendo que el vapor de agua generado en el material cargado fluya en promedio hacia abajo. Sumado a este efecto, el vapor de agua también tiene una densidad sustancialmente menor que el gas hidrógeno con el que se mezcla.

De esta forma, el contenido de agua del material cargado en el contenedor 140 se evaporará gradualmente, fluye hacia abajo a través del intercambiador de calor 160, se enfría y se condensa en el mismo y sube en estado líquido en la cubeta 161.

Se prefiere que el gas hidrógeno frío suministrado al intercambiador de calor 160, y también cualquier gas que contenga carbono suministrado, esté atemperado a temperatura ambiente o tiene una temperatura ligeramente inferior a la temperatura ambiente.

Se comprende que esta etapa de calentamiento inicial, en la que el material cargado se seca a partir de cualquier

agua líquida contenida, es una etapa preferida en el presente método. En particular, esto hace que sea fácil producir y proporcionar el material cargado como un material granular, tal como en forma de bolas laminadas de material, sin tener que introducir una etapa de secado costosa y complicada antes de cargar el material en el espacio de horno 120.

5 Sin embargo, se comprende que sería posible cargar material ya seco o secado en el espacio de horno 120. En este caso, la etapa de calentamiento inicial como se describe en el presente documento no se realizaría, pero el método saltaría inmediatamente a la etapa principal de reducción y carburización (a continuación).

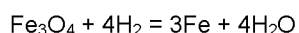
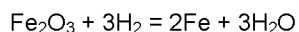
10 Es más, algunos mecanismos de esta etapa de calentamiento inicial se han descrito anteriormente con referencia tanto al gas hidrógeno añadido como al gas que contiene carbono. Estos mecanismos también están presentes en la siguiente etapa principal de reducción y carburización (véase más adelante). Sin embargo, en la etapa de calentamiento inicial se prefiere que no se agregue ningún gas que contenga carbono. En particular, se prefiere que el único gas añadido durante la etapa de calentamiento inicial sea gas hidrógeno.

15 En una realización de la presente invención, el suministro de gas hidrógeno al espacio de horno 120 durante dicha etapa de calentamiento inicial se controla para que sea tan lento que se mantenga sustancialmente un equilibrio de presión durante toda la realización de la etapa de calentamiento inicial, preferentemente de modo que prevalezca una presión sustancialmente igual en todo el espacio de horno 120 y las partes no llenas de líquido de la cubeta 161 en todo momento. En particular, el suministro de gas hidrógeno podrá controlarse de modo que dicha presión de equilibrio del gas no aumente, o sólo aumente de forma insignificante, durante la etapa de calentamiento inicial. En este caso, el suministro de gas hidrógeno se controla entonces para aumentar la presión del espacio 120 del horno con el tiempo sólo después de que toda o sustancialmente toda el agua líquida se haya evaporado del material cargado en el contenedor 140. El momento en el que esto haya ocurrido puede determinarse, por poner un ejemplo, como un cambio hacia arriba en la pendiente de una curva de temperatura a tiempo medida por el sensor de temperatura 123 y/o 124, donde el cambio de pendiente marca un punto en el que sustancialmente toda el agua líquida se ha evaporado pero la reducción aún no ha comenzado. Como alternativa, el suministro de gas hidrógeno puede controlarse para aumentar la presión una vez medida la temperatura en el espacio de horno 120, medido por el sensor de temperatura 123 y/o 124, ha superado un límite predeterminado, límite que podrá estar entre 100 °C y 150 °C, tal como entre 120 °C y 130 °C.

20 En una etapa principal posterior de reducción y carburización, además se proporciona calor y gas hidrógeno al espacio 120 del horno, de una manera correspondiente al suministro durante la etapa de calentamiento inicial descrita anteriormente, de modo que el gas hidrógeno calentado calienta el material metálico cargado a una temperatura suficientemente alta para que se reduzcan los óxidos metálicos presentes en el material metálico, provocando a su vez la formación de vapor de agua.

25 Durante esta etapa principal de reducción y carburización, por lo tanto se suministra y calienta gas hidrógeno adicional, bajo un aumento gradual de la presión dentro del espacio de horno 120, de modo que el material metálico cargado a su vez se calienta hasta una temperatura a la que se inicia y mantiene una reacción química de reducción.

30 En el ejemplo ilustrado en las Figuras 1a y 1b, por lo tanto, el material cargado más arriba se calentará primero. En el caso del material de óxido de hierro, el gas hidrógeno comenzará a reducir el material cargado para formar hierro metálico a aproximadamente 350-400 °C, formando hierro pirofítico y vapor de agua de acuerdo con las siguientes fórmulas:



35 Esta reacción es endotérmica y es impulsada por la energía térmica suministrada a través del gas hidrógeno caliente que fluye desde arriba en el espacio de horno 120.

40 Por tanto, tanto durante la etapa de calentamiento inicial como durante la etapa principal de reducción y carburización, se produce vapor de agua en el material cargado. Este vapor de agua formado se condensa y recoge continuamente en un condensador dispuesto debajo del material metálico cargado. En el ejemplo mostrado en la Figura 1a, el condensador tiene la forma del intercambiador de calor 160.

45 De acuerdo con la invención, la principal etapa de reducción y carburización, incluyendo dicha condensación, se realiza de manera que se genere una presión de más de 1 bar en el espacio de horno 120 en relación con la presión atmosférica. En particular, el gas hidrógeno se proporciona de manera que se alcance y mantenga dicha presión de más de 1 bar. Cabe señalar que una presión de este tipo superior a 1 bar es una presión superior a la presión atmosférica.

50 Adicionalmente, de acuerdo con la invención, el método comprende además una etapa de suministro de carbono, en concreto, una etapa en la que se proporciona un gas que contiene carbono al espacio 120 del horno, de modo que el

material metálico que ha sido calentado por dicho calor suministrado y reducido por reacción con dicho gas hidrógeno es carburizado por dicho gas que contiene carbono. Este suministro de gas que contiene carbono se realiza como parte de dicha etapa principal de reducción y carburización, y se realiza antes de una evacuación de gases desde el espacio de horno 120 de regreso a la presión atmosférica en el espacio de horno 120. Dicha evacuación se puede realizar como una etapa del presente método, tal como se explicará a continuación, realizada, por poner un ejemplo, como parte de una subetapa de enfriamiento de material.

El gas que contiene carbono puede ser cualquier gas que contiene carbono que pueda reaccionar químicamente con el material metálico reducido para carburizar este último. Ejemplos de gases que contienen carbono adecuados comprenden diversos hidrocarburos gaseosos (a las temperaturas y presiones que prevalecen en el espacio de horno 120 durante la realización del presente método), tales como metano, etano, propano, propeno y similares. Preferentemente, el gas que contiene carbono no contiene más que trazas de monóxido de carbono, ya que esto evitará eficientemente que tanto el monóxido de carbono como el dióxido de carbono formen productos residuales después de la finalización del presente proceso de carburización. En particular, se prefiere que no se suministre monóxido de carbono al espacio de horno 120 en dicha etapa de suministro de carbono.

Como se describirá y ejemplificará a continuación, la etapa de suministro de carbono se puede realizar al menos parcialmente al mismo tiempo que el suministro de gas hidrógeno y calor descrito anteriormente. En particular, la etapa de suministro de carbono se puede realizar como parte de dicha etapa principal de reducción y carburización.

Como se ha descrito anteriormente, durante la reducción del hierro se forma hierro libre (Fe), que luego se abre para recibir carbono (C) para formar Fe₃C.

La Figura 5 ilustra la capacidad del H₂ para reducir el Fe₂O₃ en función del aumento de temperatura. Como se insinúa en la Figura 5, la reducción con gas hidrógeno es especialmente activa en el intervalo de temperatura de aproximadamente 400°-700°.

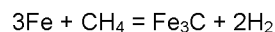
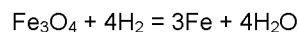
De manera correspondiente, la carburización del mismo Fe₂O₃ usando una fuente de carbono gaseoso es más activa en un intervalo que se extiende aproximadamente entre 650°-900°.

El Fe₃O₄, por poner un ejemplo, muestra propiedades similares con respecto a la reducción/carburización y la temperatura.

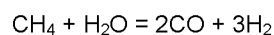
Esto significa que un proceso que primero realiza la mayor parte de la reducción del material metálico a temperaturas relativamente más bajas y luego, después del calentamiento adicional, realiza la mayor parte de la carburización del material metálico, será eficiente.

También se da el caso de que el proceso de carburización se ve favorecido por la presencia de vapor de agua, que resulta que está presente debido al proceso de reducción del mismo material metálico.

En el caso particular del metano como gas que contiene carbono y de la hematita/magnetita como material metálico, en el espacio de horno se producen las siguientes reacciones químicas de carburización:



La reacción entre CH₄ y Fe comprende una subreacción en la que el metano reacciona con el vapor de agua formado por el gas hidrógeno reductor:



A continuación, la carburización en sí se produce principalmente mediante la conocida reacción hidrógeno-agua, en la que el monóxido de carbono y el hidrógeno reaccionan con la superficie de hierro formada y forman vapor de agua, mientras que el átomo de carbono liberado se puede recoger en el lugar donde se encontraba el átomo de oxígeno previamente liberado.

Dado que la superficie del hierro reducido es porosa debido a la reducción, la superficie total del hierro normalmente es muy grande, conduciendo a un proceso de carburización eficiente, en particular cuando el material metálico se proporciona como un material granular.

Como se puede observar a partir de las fórmulas anteriores, una cierta cantidad de gas hidrógeno se forma mediante el proceso de carburización, porque se necesita menos gas hidrógeno del que se habría necesitado de otro modo.

Se prefiere que el material metálico finalmente carburizado, después de finalizar la etapa de suministro de carbono, tenga un contenido de carbono de entre 1 %-4 % en peso.

5 El suministro de gas hidrógeno en la etapa principal de reducción y carburización puede mantenerse preferentemente hasta que una presión parcial de hidrógeno predeterminada, o una presión total predeterminada superior a 1 bar, se ha alcanzado dentro del espacio de horno 120. De manera correspondiente, el suministro de gas que contiene carbono en la etapa de suministro de carbono se puede realizar hasta que una presión parcial predeterminada, o una presión total predeterminada sea superior a 1 bar, se ha alcanzado dentro del espacio de horno 120.

10 La presión dentro del espacio de horno 120 puede medirse, por poner un ejemplo, mediante el sensor de presión 123 y/o 124. Como se ha mencionado anteriormente, de acuerdo con la invención, no se evacua ningún gas hidrógeno del espacio de horno 120 hasta que se haya alcanzado dicha presión de más de 1 bar, y preferentemente no se evacua ningún gas hidrógeno del espacio de horno 120 hasta que la etapa principal de reducción y carburización haya finalizado por completo. De manera correspondiente, se prefiere que no se evacue ningún gas que contenga carbono del espacio 120 del horno hasta que se haya alcanzado dicha presión de más de 1 bar, y preferentemente no se evacue ningún gas que contenga carbono del espacio 120 del horno hasta que haya finalizado completamente la etapa principal de reducción y carburización.

15 En algunas realizaciones, el suministro de gas hidrógeno se realiza al menos hasta que se haya alcanzado una presión parcial de hidrógeno de más de 1 bar dentro del espacio de horno 120, mientras que no se evacua ningún gas hidrógeno del espacio de horno 120 hasta que se haya alcanzado dicha presión parcial del gas hidrógeno de más de 1 bar.

20 En particular, el suministro de gas hidrógeno en la etapa principal de reducción y carburización, y la condensación de vapor de agua, se puede realizar hasta que se haya alcanzado una presión predeterminada superior a 1 bar en el espacio de horno 120, presión predeterminada que es de al menos 2,3 bar, más preferentemente al menos 2,5 bar, o incluso aproximadamente 3 bar o más. Lo mismo ocurre con un posible suministro de gas que contiene carbono para regular la presión en la etapa de suministro de carbono.

25 Cabe señalar que el método puede diseñarse de modo que no se realice ninguna evacuación de hidrógeno o gas que contenga carbono hasta que se haya alcanzado esta presión predeterminada.

30 Como alternativa, el suministro de gas hidrógeno en la etapa principal de reducción y carburización, y la condensación de vapor de agua, puede realizarse hasta alcanzar un estado estable, en términos de que ya no es necesario proporcionar más gas hidrógeno para mantener una presión de gas en estado estable alcanzada dentro del espacio de horno 120. Esta presión se puede medir de la manera correspondiente como se ha descrito anteriormente. Preferentemente, la presión del gas en estado estacionario puede ser de al menos 2,3 bar, más preferentemente al menos 2,5 bar, o incluso aproximadamente 3 bar o más. De esta forma, se consigue una forma sencilla de saber cuándo se ha completado el proceso de reducción.

35 Además, como alternativa, el suministro de gas hidrógeno y calor en la etapa principal de reducción y carburización, y la condensación de vapor de agua, puede realizarse hasta que el material metálico cargado a reducir haya alcanzado una temperatura predeterminada, que puede ser de al menos 600 °C, tal como entre 640-680 °C, preferentemente de aproximadamente 660 °C. La temperatura del material cargado se puede medir directamente, por poner un ejemplo, midiendo la radiación de calor del material cargado usando un sensor adecuado, o indirectamente mediante el sensor de temperatura 123.

40 En algunas realizaciones, la principal etapa de reducción y carburización, incluyendo dicha condensación del vapor de agua formado, se realiza durante un período de tiempo continuo de al menos 0,25 horas, tal como al menos 0,5 horas, tal como al menos 1 hora. Durante todo este tiempo, tanto la presión como la temperatura del espacio de horno 120 pueden aumentar monótonamente.

45 En algunas realizaciones, la etapa principal de reducción y carburización puede realizarse además de forma iterativa, en cada iteración, el dispositivo de control 201 permite alcanzar una presión de estado estable dentro del espacio de horno 120 antes de suministrar una cantidad adicional de gas hidrógeno al espacio de horno. El suministro de calor también puede ser iterativo (pulsado) o estar en un estado encendido durante toda la etapa principal de reducción y carburización.

50 Se observa que, durante la realización tanto de la etapa de calentamiento inicial como de las etapas principales de reducción y carburización, y en particular al menos durante sustancialmente toda la longitud de estas etapas, hay un flujo neto hacia abajo de vapor de agua a través del material metálico cargado en el contenedor 140.

55 Durante la etapa inicial y la etapa principal de reducción y carburización, con la posible excepción de un período de tiempo relacionado con el inicio de la etapa de suministro de carbono, en la que se puede disminuir la presión total del espacio 120 del horno, el compresor 270 puede ser controlado controlarse, por el dispositivo de control 201, para, en todo momento, mantener o aumentar la presión suministrando gas hidrógeno adicional y/o gas que contiene carbono. El gas hidrógeno suministrado se utiliza para compensar el hidrógeno consumido en el proceso de reducción y también para aumentar gradualmente la presión hasta una presión final deseada. El gas que contiene carbono se puede

suministrar usando cualquiera de varias estrategias diferentes (como se explica a continuación) y, por poner un ejemplo, se puede controlar para lograr una presión total objetivo establecida en el espacio de horno 120 durante dicho suministro.

5 La formación de vapor de agua en el material cargado aumenta la presión del gas localmente, creando de hecho una variación de presión entre el espacio de horno 120 y la cubeta 161. Como resultado, el vapor de agua formado descenderá a través del material cargado y se condensará en el intercambiador de calor 160, reduciendo a su vez la presión en el lado distante (en relación con el espacio de horno 120) del intercambiador de calor 160. Estos procesos crean así un movimiento neto descendente de gas a través de la carga, donde el gas hidrógeno recién añadido
10 compensa la pérdida de presión en el espacio de horno 120.

El contenido térmico del gas que sale del espacio de horno 120 y, en particular, el calor de condensación del vapor de agua, se transfiere al gas entrante que contiene hidrógeno/carbono en el intercambiador de calor 160.

15 Por tanto, el proceso de reducción se mantiene mientras haya material metálico para reducir y, por lo tanto, se produzca vapor de agua, dando como resultado dicho movimiento de gas hacia abajo. Una vez que se detiene la producción de vapor de agua (debido a que se ha reducido sustancialmente todo el material metálico), la presión se iguala en todo el interior del horno 100, y la temperatura medida será similar en todo el espacio de horno 120, en caso de que no se suministre gas adicional que contenga carbono. Por poner un ejemplo, una diferencia de presión medida
20 entre un punto en la parte llena de gas de la cubeta 161 y un punto por encima del material cargado será menor que una cantidad predeterminada, que puede ser como máximo 0,1 bar. De manera adicional o como alternativa, una diferencia de temperatura medida entre un punto por encima del material cargado y un punto por debajo del material cargado pero en el lado del espacio de horno 120 del intercambiador de calor será menor que una cantidad predeterminada, que puede ser como máximo 20 °C. Por eso, cuando se alcanza y mide dicha homogeneidad de
25 presión y/o temperatura, el suministro de gas hidrógeno puede detenerse cortando el suministro de gas hidrógeno.

Normalmente, el elemento calefactor 121 no se apaga hasta que haya finalizado la carburización, que normalmente ocurrirá en un momento posterior.

30 Por tanto, el suministro de la combinación de gas hidrógeno y calor en la etapa principal de reducción y carburización se puede realizar hasta que se haya alcanzado una temperatura mínima predeterminada y/o (sobre)presión, y/o hasta una diferencia de temperatura máxima predeterminada y/o presión máxima. Se ha alcanzado una diferencia en el volumen calentado en el horno 100. Los criterios que se utilizan dependen de los requisitos previos, tales como el diseño del horno 100 y el tipo de material metálico a reducir. Por poner un ejemplo, podrá realizarse un suministro de
35 calor hasta alcanzar una temperatura mínima predeterminada, mientras que el suministro de gas hidrógeno podrá realizarse hasta alcanzar la homogeneidad de temperatura. En otro ejemplo, el suministro de la combinación de calor y gas hidrógeno se puede realizar hasta que se haya alcanzado un estado de presión estable sin que sea necesario ningún suministro adicional de gas hidrógeno.

40 También es posible usar otros criterios, tales como un tiempo de calefacción principal predeterminado o la finalización de un programa de suministro de hidrógeno/calefacción predeterminado, que a su vez puede determinarse empíricamente.

Dicho gas que contiene carbono se puede suministrar utilizando una de varias estrategias diferentes.

45 Primer ejemplo

En una primera estrategia de este tipo, la reducción utilizando gas hidrógeno va seguida directamente de la carburización del material metálico. En primer lugar, el gas hidrógeno y el calor se suministran como se ha descrito anteriormente, para aumentar lentamente la temperatura y la presión en el espacio de horno 120 a medida que se reduce el material metálico. La presión final puede ser como se ha descrito anteriormente, por poner un ejemplo al menos 1,1 bar y preferentemente al menos entre 2,3-2,5 bar.

55 En este y otros ejemplos, cuando haya finalizado la reducción de la carga completa de material metálico, el espacio de horno 120 ha alcanzado una temperatura de aproximadamente 700 °C, y la temperatura del gas hidrógeno que entra al espacio de horno tiene la misma temperatura que la del gas que entra al intercambiador de calor 160.

60 Generalmente en esta primera estrategia, se puede proporcionar calor en dicha etapa principal de reducción y carburización hasta que el material metálico alcance una temperatura de al menos 500 °C, tal como al menos el 600 °C, antes de que comience el suministro del gas que contiene carbono en dicha etapa de suministro de carbono.

En este estado, cuando la reducción se haya completado, todavía no se ha suministrado ningún gas que contenga carbono. Antes de hacer esto, o en relación con hacer esto, parte del gas hidrógeno se puede evacuar para reducir la presión parcial del gas hidrógeno. En concreto, la válvula V4 puede cerrarse para finalizar el suministro de gas hidrógeno. A continuación, el compresor 270 puede usarse para evacuar parte del gas hidrógeno, cerrando la válvula V6 y abriendo las válvulas V7 y V5 al contenedor de almacenamiento 280 para hidrógeno usado. Cuando la presión

haya bajado, a una presión inferior de entre 1,1 y 1,8 bar, tal como entre 1,3 y 1,6 bar, tal como a aproximadamente 1,5 bar, las válvulas V7 y V5 se cierran y comienza la etapa de suministro de carbono.

5 Como se ilustra en la Figura 4a, después de esta evacuación parcial del gas hidrógeno, la presión total en el espacio de horno 120 es aproximadamente 1,5 en este ejemplo.

10 En general, la etapa de provisión de carbono puede ser al menos en parte, preferentemente completamente, se realiza a una presión del espacio de horno 120 que es inferior a la presión del espacio de horno 120 que prevalece en el momento de finalizar el proceso de reducción.

15 En el contenedor de almacenamiento 310, un gas de carbohidratos frescos, por ejemplo metano, se almacena, y en el contenedor 320 se almacena gas carbohidrato previamente usado (tal como una mezcla de metano e hidrógeno). Durante el primer uso para carburizar, se abre la válvula V15, si no está abierta la válvula V17, en caso de que la presión en el contenedor 320 sea mayor que la que prevalece en el espacio de horno 120. De otra manera, las válvulas V18 y V6 se abren para que el compresor 270 pueda presionar la cantidad de hidrocarburo necesaria para mantener la presión en el espacio de horno 120 para realizar la carburización.

20 En este punto, el material metálico recién reducido puede aceptar el carbono proporcionado. La carburización se lleva a cabo bajo una temperatura aumentada del espacio de horno 120, mediante calentamiento utilizando el elemento calefactor 121. Dependiendo de la constitución del material metálico, la carburización finaliza cuando la temperatura ha alcanzado aproximadamente 700 °C-1100 °C. Como se ha mencionado anteriormente, durante la carburización se forma como resultado una cierta cantidad de hidrógeno.

25 En lo sucesivo, se pueden iniciar las etapas de enfriamiento y vaciado que se describen a continuación.

30 La Figura 4a ilustra, en un gráfico esquemático, un proceso de acuerdo con esta primera estrategia, en el que se añade el gas que contiene carbono una vez completada la reducción. El gráfico ilustra la presión parcial del gas hidrógeno (línea continua) en función de la temperatura del espacio de horno (120), y también la presión parcial del gas que contiene carbono (línea discontinua) en función de la temperatura del espacio de horno (120), durante el proceso.

Cabe señalar que la Figura 4a, como es el caso también de las Figuras 4b y 4c, se simplifican en el sentido de que ignoran cualquier gas residual presente en el espacio de horno 120 después de la evacuación inicial.

35 Segundo ejemplo

En una segunda estrategia, el gas que contiene carbono se suministra antes de que se complete la reducción.

40 Durante el calentamiento y el inicio de la reducción, se suministra gas hidrógeno para conseguir una presión total creciente en el espacio de horno 120 de al menos 1,1 bar, y preferentemente al menos 2,3 bar. En este caso, el gas que contiene carbono se suministra poco después de que haya comenzado la reducción, en otras palabras, después de que la temperatura en el espacio de horno 120 haya alcanzado al menos 350 °C, tal como entre 350-450 °C, tal como por ejemplo a aproximadamente 400 °C. En general, en esta segunda estrategia, la etapa de suministro de carbono sólo comienza después de que el material metálico haya alcanzado una temperatura de entre 350-450 °C.

45 El suministro del gas que contiene carbono se realiza entonces cerrando la válvula V1 o V3 y abriendo la V15 (en caso de que se trate de la primera reducción), de lo contrario se abre la válvula V17. Como resultado, el espacio de horno 120 comienza a llenarse con gas que contiene carbono. Esto significa que la reducción y la carburización tienen lugar en paralelo durante la etapa principal de reducción y carburización, y la presión se mantiene mediante el gas que contiene carbono suministrado. En caso de que la presión en el contenedor 320 no sea suficiente para suministrar el gas que contiene carbono, las válvulas V18 y V6 se abren y las válvulas V12, V13 y V14 están cerrados, de modo que el compresor 270 pueda comenzar lentamente a traer más gas que contiene carbono y mantener así la presión en el espacio de horno 120 a la presión final deseada de al menos 2,3-3,5 bar.

50 Durante todo el proceso de reducción, tanto calor como más gas que contiene carbono hasta que la reducción se acerque a su fin, que tiene lugar a aproximadamente 700 °C, temperatura a la que el gas que sale de la carga tiene la misma temperatura que el gas que entra en la carga. En este punto, la temperatura se aumenta hasta una temperatura final de más de 700 °C y preferentemente como máximo 1100 °C mientras la presión se mantiene mediante un suministro continuo de gas mezclado desde el contenedor 320, que contiene una mezcla de gas hidrógeno y gas que contiene carbono.

55 En lo sucesivo, se pueden iniciar las etapas de enfriamiento y vaciado que se describen a continuación.

60 La Figura 4b es un gráfico correspondiente al mostrado en la Figura 4a, pero que ilustra esta segunda estrategia.

65 Tercer ejemplo

En una tercera estrategia, el suministro de gas que contiene carbono comienza cuando la reducción alcanza su máximo. Para hematita y magnetita, esto ocurre entre 550-570 °C aproximadamente.

5 En esta estrategia, la presión se aumenta a al menos 1,1 bar, preferentemente a al menos 2,3-2,5 bar mediante suministro de gas hidrógeno desde el contenedor 290 como se ha descrito anteriormente, a través de la válvula V1 o abriendo las válvulas V2/V6 y utilizando el compresor 270, dependiendo de la presión del gas hidrógeno disponible en el contenedor 290. Al mismo tiempo, se suministra calor al espacio de horno 120 como se ha descrito anteriormente.

10 A medida que la temperatura de los gases que salen de la carga se acerca a los 500 °C, se corta el suministro de gas hidrógeno. En este punto, la mayor parte de la carga ya se habrá reducido por completo y ahora estará compuesta de hierro pirofórico, que está listo para recibir el carbono suministrado a través del gas que contiene carbono. Esto se logra controlando las válvulas V1-V4 para gas hidrógeno y abriendo la válvula V15 para gas fresco que contiene carbono del contenedor 310.

15 En caso de que la presión en el contenedor 310 no sea suficiente, las válvulas V15 y V1 se cierran mientras que la válvula V6 se abre, y el compresor 270 se utiliza para mantener la presión deseada. La carburización tiene lugar después o parcialmente en paralelo a la reducción y la presión se mantiene mediante el suministro del gas que contiene carbono. Como se ha mencionado anteriormente, se forma una cierta cantidad de gas hidrógeno como resultado de la carburización, y un aumento de presión resultante no deseado se puede manejar evacuando parte de la atmósfera del espacio de horno 120 al contenedor 320 abriendo las válvulas V7 y V19, y permitiendo que el compresor 270 presione la mezcla de gas que contiene hidrógeno/carbono desde el espacio 120 del horno al contenedor 320.

20 Cuando la temperatura en el lado de salida de la carga es la misma que en el lado de entrada, preferentemente entre 650-750 °C, tal como entre 690-700 °C, la temperatura aumenta a presión constante, más precisamente una presión de al menos 1,1, preferentemente a al menos 2,3-2,5 bar, a una temperatura más alta, que es al menos de 800 °C, tal como 800-1100 °C. La presión constante se mantiene mediante el suministro de gas que contiene carbono, preferentemente gas fresco que contiene carbono del contenedor 310 a través de la válvula V15, o a través de las válvulas V16 y V6 usando el compresor 270 si es necesario.

30 En lo sucesivo, se pueden iniciar las etapas de enfriamiento y vaciado que se describen a continuación.

35 En general, en esta tercera estrategia, la etapa de suministro de carbono sólo comienza después de que el material metálico haya alcanzado una temperatura de entre 450 y 550 °C, y posteriormente puede terminarse el suministro de gas hidrógeno. Por otra parte, la etapa de suministro de carbono también puede comprender continuar proporcionando calor al espacio 120 del horno.

40 Asimismo, en general en esta tercera estrategia, el calor se proporciona en la etapa principal de reducción y carburización, y en particular durante la etapa de suministro de carbono, hasta que el material metálico alcance una temperatura de entre 700-1100 °C, tal como entre 800-1100 °C.

45 Como se ha mencionado, la etapa de suministro de carbono en esta tercera estrategia puede comprender proporcionar calor al espacio de horno 120 a una presión constante, presión que está controlada por un suministro controlado de gas que contiene carbono, y que siempre que contenga carbono pueda mezclarse o no con gas hidrógeno.

La Figura 4c es un gráfico correspondiente al mostrado en la Figura 4a, pero que ilustra esta tercera estrategia. Se observa particularmente que la presión parcial del gas hidrógeno disminuye por encima de 600 °C, que se debe al hidrógeno formado por la reacción de carburización.

50 Después de que se haya producido la reducción total y la carburización, el método de acuerdo con la presente invención comprende una etapa de enfriamiento y vaciado, que se describirá a continuación.

55 Por tanto, en una etapa de enfriamiento posterior, la atmósfera de gas hidrógeno/gas que contiene carbono en el espacio de horno 120 se enfría luego a una temperatura de como máximo 100 °C, preferentemente aproximadamente 50 °C, y luego se evacua del espacio de horno 120 y se recoge.

60 En el caso de un solo horno 100/220, que no está conectado a uno o varios hornos, el material cargado puede enfriarse usando el ventilador 250, que está dispuesto aguas abajo del enfriador de tipo gas-agua 240, estando dispuesto a su vez para enfriar el gas que contiene hidrógeno/carbono (que circula en un circuito cerrado por el ventilador 250 en un circuito que pasa por la válvula V12, el intercambiador de calor 240, el ventilador 250 y la válvula V10, saliendo del espacio de horno 120 a través del conducto de salida 173 y entrando nuevamente al espacio de horno 120 a través del conducto de entrada 171). Esta circulación de enfriamiento se muestra mediante las flechas en la Figura 1b.

65 Por lo tanto, el intercambiador de calor 240 transfiere la energía térmica del gas que contiene hidrógeno/carbono circulado al agua (o un líquido diferente), desde donde se puede aprovechar de manera adecuada la energía térmica, por poner un ejemplo, en un sistema de calefacción urbana. El circuito cerrado se logra cerrando todas las válvulas

V1-V19 excepto las válvulas V10 y V12.

5 Puesto que en este caso el gas que contiene hidrógeno/carbono circula más allá del material cargado en el contenedor 140, absorbe energía térmica del material cargado, proporcionando un enfriamiento eficiente del material cargado mientras el gas que contiene hidrógeno/carbono circula en un circuito cerrado.

10 En un ejemplo diferente, la energía térmica disponible del enfriamiento del horno 100/220 se utiliza para precalentar un horno 210 diferente. Esto se consigue entonces mediante el dispositivo de control 201, en comparación con el circuito cerrado de refrigeración descrito anteriormente, cerrando la válvula V12 y en su lugar abriendo las válvulas V13, V14. De esta forma, el gas caliente que contiene hidrógeno/carbono que llega desde el horno 220 se lleva al intercambiador de calor de tipo gas-gas 230, que es preferentemente un intercambiador de calor a contracorriente, en el que el gas hidrógeno que se suministra en una etapa inicial o principal de reducción y carburización realizada en relación con el otro horno 210 se precalienta en el intercambiador de calor 230. En lo sucesivo, el gas que contiene hidrógeno/carbono algo enfriado procedente del horno 220 puede hacerse circular más allá del intercambiador de calor 240 para su enfriamiento adicional antes de reintroducirlo en el horno 220. De nuevo, el gas que contiene hidrógeno/carbono del horno 220 se hace circular en un circuito cerrado usando el ventilador 250.

20 Por tanto, el enfriamiento del gas que contiene hidrógeno/carbono en la etapa de enfriamiento puede tener lugar mediante intercambio de calor con gas hidrógeno que se suministrará a un espacio 120 del horno 210 diferente para realizar las etapas de calentamiento inicial y principal y la condensación, como se ha descrito anteriormente, en relación con el espacio 120 de dicho horno 210 diferente.

25 Una vez que el gas que contiene hidrógeno/carbono no está lo suficientemente caliente para calentar el gas hidrógeno suministrado al horno 210, el dispositivo de control 201 cierra de nuevo las válvulas V13, V14 y vuelve a abrir la válvula V12, de modo que el gas que contiene hidrógeno/carbono del horno 220 se lleva directamente al intercambiador de calor 240.

30 Independientemente de cómo se cuide su energía térmica, el gas que contiene hidrógeno/carbono del horno 220 se enfría hasta que (o, más importante aún, el material cargado) alcanza una temperatura inferior a 100 °C, para evitar la reoxidación del material cargado cuando posteriormente se exponga al aire. La temperatura del material cargado se puede medir directamente, de manera adecuada como la descrita anteriormente, o indirectamente, midiendo de manera adecuada la temperatura del gas que contiene hidrógeno/carbono que sale por el conducto de salida 173.

35 El enfriamiento del gas que contiene hidrógeno/carbono puede tener lugar mientras se mantiene la presión del gas que contiene hidrógeno/carbono, o la presión del gas que contiene hidrógeno/carbono puede reducirse como resultado del calentamiento de hidrógeno/gas que contiene carbono. Se permite que el gas que contiene ocupe un volumen mayor (de los conductos de circuito cerrado y de los intercambiadores de calor) una vez que se abren las válvulas V10 y V12.

40 En una etapa posterior, el gas que contiene hidrógeno/carbono se evacua del horno 220, espacio 120, y se recoge en un contenedor adecuado para el gas usado. Normalmente, el espacio de horno 120 contendrá en este punto una mezcla de hidrógeno y gas que contiene carbono, y esta mezcla luego se evacua al contenedor 320 para el gas que contiene carbono usado, utilizando la bomba de vacío 260, posiblemente en combinación con el compresor 270. El dispositivo de control abre las válvulas V13, V14, V8 y V19, y cierra las válvulas V1-V7 y V15-V18. A continuación, la bomba de vacío 260 y el compresor 270 se accionan para presionar la mezcla de gas usada en el contenedor 320. La evacuación del espacio de horno 120 se realiza preferentemente hasta una presión de como máximo 0,5 bar, o incluso como máximo 0,3 bar, se detecta dentro del espacio de horno 120.

50 Puesto que el espacio de horno 120 está cerrado, sólo el gas que contiene hidrógeno/carbono consumido en la reacción de reducción química se ha eliminado del sistema, y el gas hidrógeno restante es el que era necesario para mantener el equilibrio gas hidrógeno/vapor de agua en el espacio de horno 120 durante la etapa principal de reducción y carburización. Este gas hidrógeno evacuado es totalmente útil para una operación por lotes posterior de una nueva carga de material metálico a reducir.

55 En lo sucesivo, las válvulas v7, V8, V19 se cierran y la válvula V9 se abre para permitir que entre aire al sistema para cambiar el material cargado, y la válvula V11 se abre para vaciar el agua condensada.

60 En una etapa posterior, se abre el espacio de horno 120, tal como liberando los medios de sujeción 111 y abriendo la parte superior 110. El contenedor 140 se retira y se reemplaza con un contenedor con un nuevo lote de material metálico cargado que se va a reducir.

En una etapa posterior, el material reducido eliminado puede entonces disponerse bajo una atmósfera inerte, tal como una atmósfera de nitrógeno, para evitar la reoxidación durante el transporte y almacenamiento.

65 Por poner un ejemplo, el material metálico reducido puede disponerse en un contenedor de transporte flexible o rígido que está lleno de gas inerte. En un contenedor de transporte se pueden disponer varios contenedores flexibles o

rígidos de este tipo, que luego puede llenarse con gas inerte en el espacio que rodea los contenedores flexibles o rígidos. En lo sucesivo, el material metálico reducido se puede transportar de forma segura sin correr el riesgo de reoxidación.

5 La siguiente tabla muestra el equilibrio aproximado entre el gas hidrógeno H₂ y vapor de agua H₂O para diferentes temperaturas dentro del espacio de horno 120:

Temperatura (°C):	400	450	500	550	600
H ₂ (% en vol.):	95	87	82	78	76
H ₂ O (% en vol.):	5	13	18	22	24

10 Se requieren aproximadamente 417 Nm³ de gas hidrógeno H₂ para reducir 1000 kg de Fe₂O₃, y se requieren aproximadamente 383 m³ de gas hidrógeno H₂ para reducir 1000 kg de Fe₃H₄.

La siguiente tabla muestra la cantidad de gas hidrógeno necesaria para reducir 1000 kg de Fe₂O₃ y Fe₃O₄, respectivamente, a presión atmosférica y en sistema abierto (de acuerdo con la técnica anterior), pero a diferentes temperaturas:

15

Temperatura (°C):	400	450	500	550	600
Nm ³ de H ₂ / tonelada de Fe ₂ O ₃ :	8340	3208	2317	1895	1738
Nm ³ de H ₂ / tonelada de Fe ₃ O ₄ :	7660	2946	2128	1741	1596

La siguiente tabla muestra la cantidad de gas hidrógeno necesaria para reducir 1000 kg de Fe₂O₃ y Fe₃O₄, respectivamente, a diferentes presiones y para diferentes temperaturas:

Temperatura (°C):	400	450	500	550	600
Nm ³ de H ₂ / tonelada de Fe ₂ O ₃ :					
1 bar	8340	3208	2317	1895	1738
2 bar	4170	1604	1158	948	869
3 bar	2780	1069	772	632	579
Nm ³ de H ₂ / tonelada de Fe ₃ O ₄ :					
1 bar	7660	2946	2128	1741	1596
2 bar	3830	1473	1064	870	798
3 bar	2553	982	709	580	532

20

Como se ha descrito anteriormente, la etapa principal de reducción y carburización de acuerdo con la presente invención se realiza preferentemente hasta una presión de más de 1 bar y una temperatura alta. Durante la mayor parte de una parte de la etapa principal de reducción y carburización en la que la reducción parcial está en curso, se ha descubierto que es ventajoso utilizar una combinación de una temperatura del gas hidrógeno calentado de al menos 500 °C y una presión en el espacio de horno 120 de al menos 2,3 bar.

25

Anteriormente, se han descrito realizaciones preferidas. Sin embargo, es evidente para el experto que se pueden realizar muchas modificaciones a las realizaciones divulgadas sin apartarse de la idea básica de la invención.

30

Por poner un ejemplo, la geometría del horno 100 puede diferir, dependiendo de los requisitos previos detallados.

El intercambiador de calor 160 se describe como un intercambiador de calor de tubos. Aunque se haya demostrado que esto es especialmente ventajoso, se comprende que son posibles otros tipos de intercambiadores de calor/condensadores gas-gas. El intercambiador de calor 240 puede tener cualquier configuración adecuada.

35

El calor sobrante del gas enfriado que contiene hidrógeno/carbono también se puede utilizar en otros procesos que requieren energía térmica.

40

El material metálico a reducir y carburizar se ha descrito como óxidos de hierro. Sin embargo, el presente método y sistema también se puede usar para reducir y carburizar material metálico tal como los óxidos metálicos mencionados anteriormente que contienen Zn y Pb, que se evaporan a temperaturas inferiores a aproximadamente 600-700 °C.

45

Los presentes principios combinados de reducción directa y carburización también se pueden usar con materiales metálicos que tengan temperaturas de reducción más altas que el mineral de hierro, con ajustes adecuados a la construcción del horno 100, como por ejemplo con respecto a los materiales de construcción usados.

Por tanto, la invención no se limita a las realizaciones descritas, pero puede variar dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Método para la producción por lotes de material metálico de reducción directa, que comprende las etapas:

- 5 a) cargar material metálico a reducir en un espacio de horno (120);
b) evacuar una atmósfera existente del espacio de horno (120) para lograr una presión de gas menor que 1 bar dentro del espacio de horno (120);
c) proporcionar calor y gas hidrógeno al espacio de horno (120), de modo que el gas hidrógeno calentado caliente el material metálico cargado a una temperatura lo suficientemente alta como para que se reduzcan los óxidos metálicos presentes en el material metálico, provocando a su vez que se forme vapor de agua, suministro de gas hidrógeno que se realiza de manera que se acumule una presión de más de 1 bar dentro del espacio de horno (120) y sin recirculación del gas hidrógeno durante la reducción del material metálico por lo que el gas hidrógeno se suministra al horno, pero no se retira del mismo durante la reducción; en donde el gas hidrógeno se suministra a una parte superior del espacio de horno (120), y
10
15 d) antes de una evacuación de gases desde el espacio de horno (120) de vuelta a la presión atmosférica, condensar y recoger el vapor de agua formado en la etapa c en un condensador (160) debajo del material metálico cargado; y
e) antes de una evacuación de gases desde el espacio de horno (120) de vuelta a la presión atmosférica, proporcionar un gas que contiene carbono en la parte superior del espacio de horno (120), de modo que el material metálico calentado y reducido sean carburizados por dicho gas que contiene carbono.
20

2. Método de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el suministro del gas que contiene carbono no se realiza hasta que el material metálico se haya reducido al menos parcialmente.
25

3. Método de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en donde

en donde el gas hidrógeno se suministra a través de un conducto de entrada (172), y
en donde el gas que contiene carbono se suministra a través del conducto de entrada (172).
30

4. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde

la etapa de cargar el material metálico en el espacio de horno (120) comprende cargar un contenedor (140) con el material metálico en el espacio de horno (120); en donde el contenedor (140) está soportado sobre un suelo refractario del espacio de horno (120) de una manera que permite que el gas pase debajo del contenedor (140) a lo largo de canales abiertos o cerrados (172) formados en dicho suelo, en donde los canales (172) pasan desde una entrada (171) para gas hidrógeno y gas que contiene carbono radialmente hacia afuera hasta una periferia radial del espacio de horno (120) y después hacia arriba hasta una parte superior del espacio de horno (120), en donde el gas hidrógeno se suministra a la parte superior del espacio de horno (120) a través de los canales (172), y
en donde el gas que contiene carbono se proporciona a través de dichos canales (172).
35
40

5. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que las etapas c y d se realizan al menos hasta que se haya alcanzado una presión parcial de hidrógeno de más de 1 bar dentro del espacio de horno (120), y por que no se evacúa gas hidrógeno desde el espacio de horno (120) hasta que se haya alcanzado dicha presión parcial de más de 1 bar.
45

6. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la etapa c comprende, además, en una etapa de calentamiento inicial, proporcionar calor y gas hidrógeno al espacio de horno (120), de modo que el gas hidrógeno calentado caliente el material metálico cargado a una temperatura por encima de la temperatura de ebullición del agua contenida en el material metálico, provocando que dicha agua contenida se evapore.
50

7. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el gas hidrógeno que va a proporcionarse en la etapa c se precalienta en un intercambiador de calor (160), intercambiador de calor (160) que está dispuesto para transferir energía térmica desde el agua evaporada al gas hidrógeno que va a proporcionarse en la etapa c.
55

8. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el gas que contiene carbono que va a proporcionarse en la etapa c se precalienta en un intercambiador de calor (160), intercambiador de calor (160) que está dispuesto para transferir energía térmica desde el agua evaporada al gas que contiene carbono que va a proporcionarse en la etapa e.
60

9. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el suministro de gas hidrógeno en la etapa c y/o el suministro del gas que contiene carbono en la etapa e se realizan hasta que se haya alcanzado una presión predeterminada.
65

10. Método de acuerdo con la reivindicación 9, caracterizado por que la presión predeterminada es una presión de al menos 2,3 bares, tal como al menos 2,5 bares, tal como al menos 3 bares.
- 5 11. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que, durante la realización de la etapa c, hay un flujo neto hacia abajo de vapor de agua a través del material metálico cargado.
12. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el gas que contiene carbono es un hidrocarburo gaseoso y por que no se suministra monóxido de carbono al espacio de horno (120) en la etapa e.
- 10 13. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la etapa e se realiza al menos parcialmente al mismo tiempo que las etapas c y d.
- 15 14. Método de acuerdo con la reivindicación 13, caracterizado por que la etapa d comprende proporcionar calor al espacio de horno (120) a presión constante, presión que se controla mediante un suministro controlado de gas que contiene carbono, que, al contener carbono, puede mezclarse con gas hidrógeno.
- 20 15. Sistema (100; 200) para la producción por lotes de material metálico de reducción directa, que comprende
- un espacio de horno cerrado (120) dispuesto para recibir material metálico cargado a reducir;
- un medio de evacuación de la atmósfera (260) dispuesto para evacuar una atmósfera existente del espacio de horno (120) para lograr una presión de gas menor que 1 bar dentro del espacio de horno (120);
- un medio de suministro de calor e hidrógeno (171; 280, 290) dispuesto para proporcionar calor y gas hidrógeno al espacio de horno (120);
- 25 caracterizado por que el sistema (100; 200) comprende además un dispositivo de control (201) dispuesto para controlar el medio de suministro de calor e hidrógeno (171; 280, 290) de modo que el gas hidrógeno calentado caliente el material metálico cargado a una temperatura lo suficientemente alta como para que se reduzcan los óxidos metálicos presentes en el material metálico, provocando a su vez que se forme vapor de agua, suministro de gas hidrógeno que se realiza de manera que se acumule una presión de más de 1 bar dentro del espacio de
- 30 horno (120) sin recirculación del gas hidrógeno durante la reducción del material metálico por lo que el gas hidrógeno se suministra al horno, pero no se retira del mismo durante la reducción; en donde el gas hidrógeno se suministra a una parte superior del espacio de horno (120); y
- un medio de enfriamiento y recogida (160, 161) dispuesto por debajo del material metálico cargado, dispuesto para condensar y recoger el vapor de agua antes de una evacuación de gases del espacio de horno (120) de vuelta a la presión atmosférica, y
- 35 un medio de suministro de gas que contiene carbono (171; 310, 320) dispuesto para proporcionar un gas que contiene carbono al espacio de horno (120) en la parte superior del espacio de horno (120), y en el que el dispositivo de control (201) está dispuesto para controlar el medio de suministro de gas que contiene carbono (171; 310, 320)
- 40 para proporcionar gas que contiene carbono antes de una evacuación de gases desde el espacio de horno (120) de vuelta a la presión atmosférica, de modo que el material metálico calentado y reducido sea carburizado por dicho gas que contiene carbono.

Fig. 1a

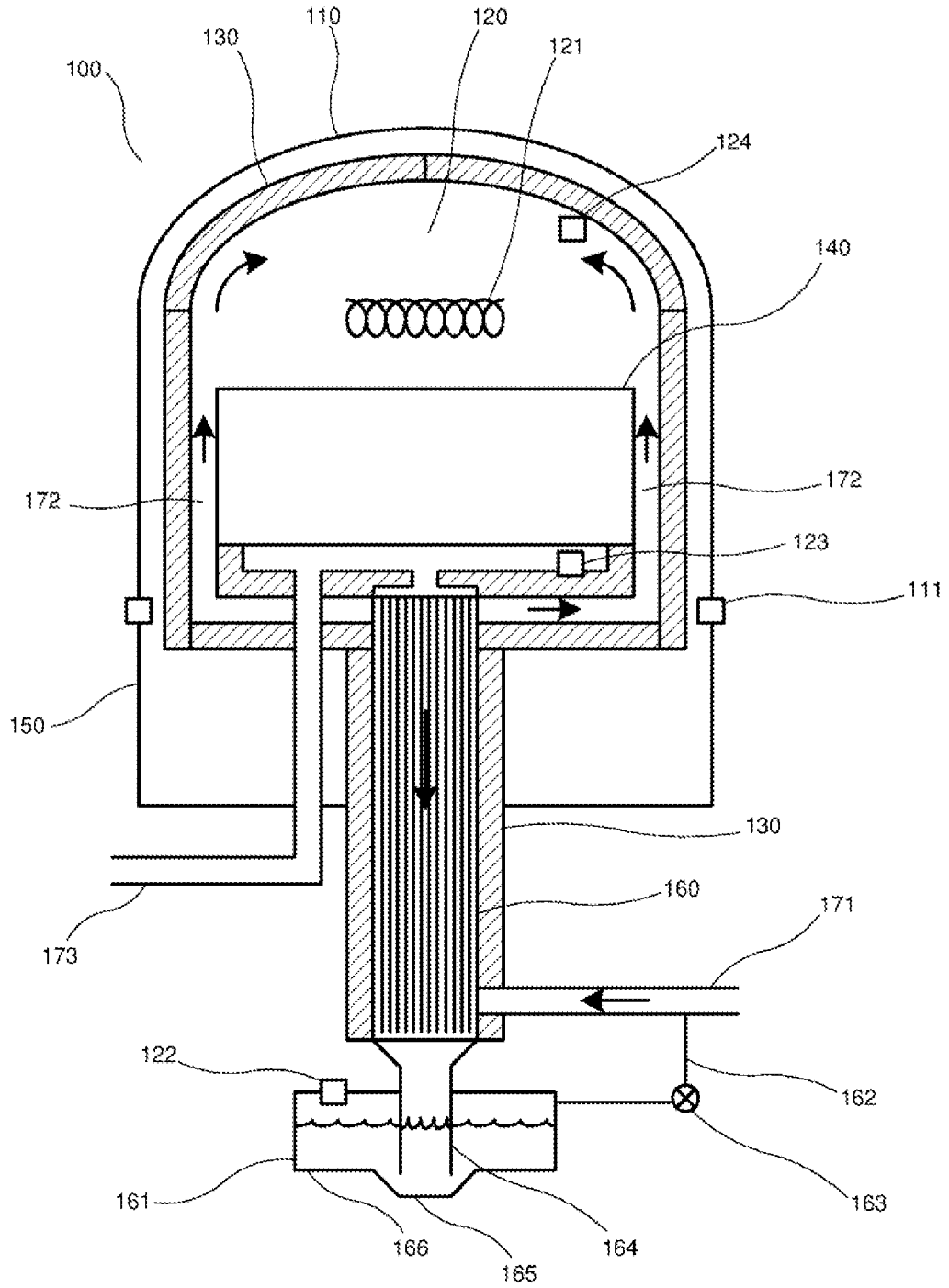


Fig. 1b

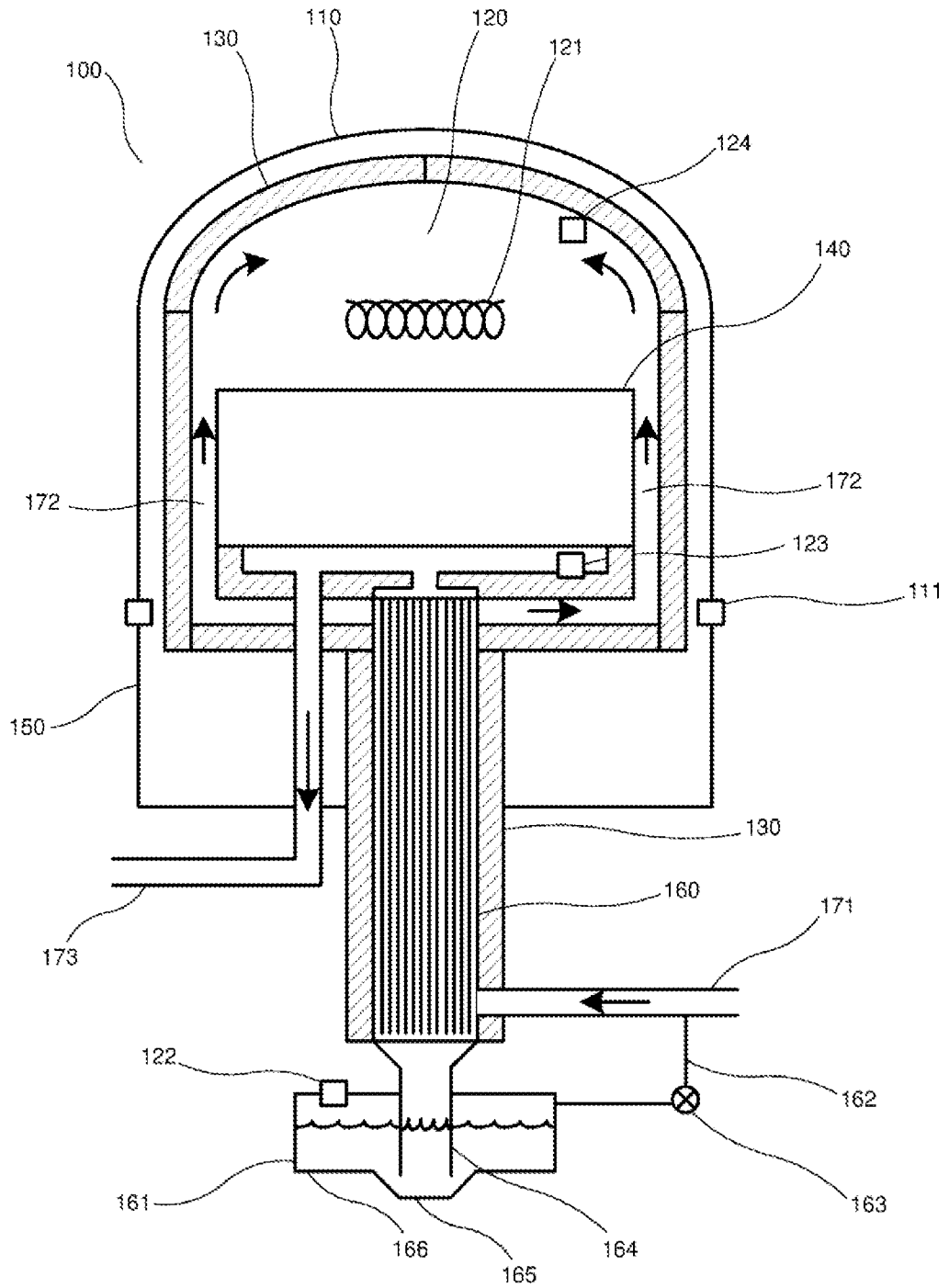


Fig. 2

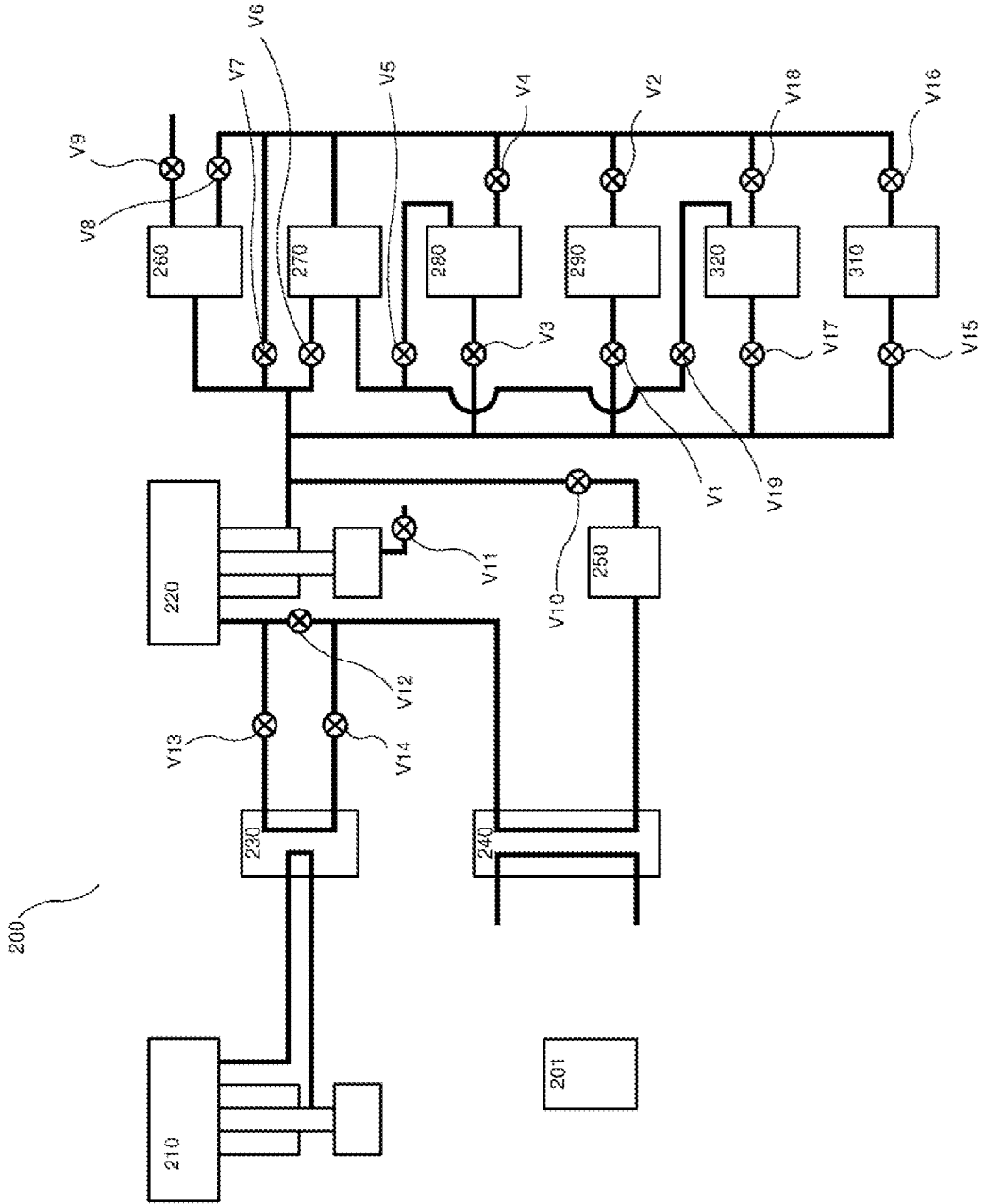
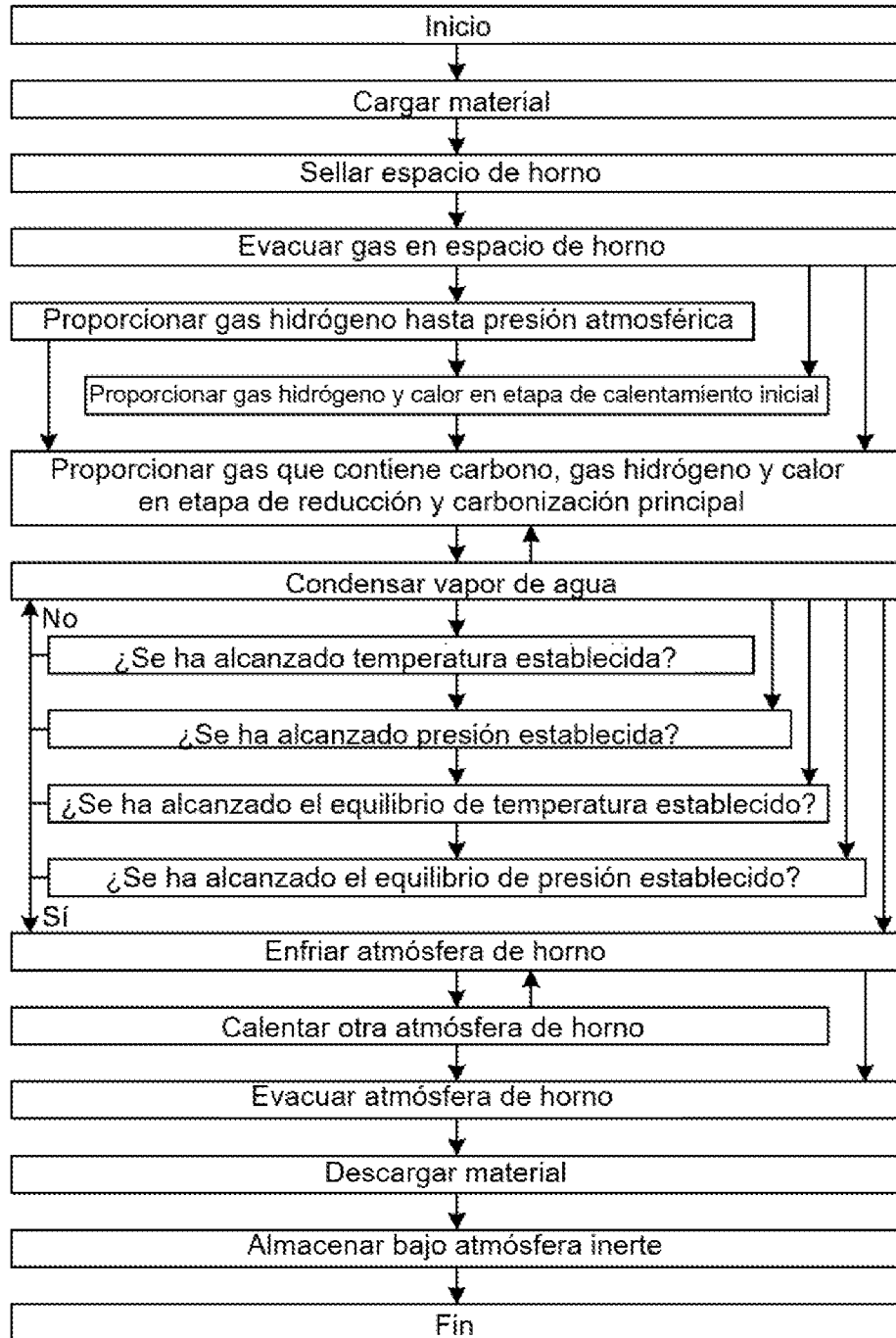


Fig. 3



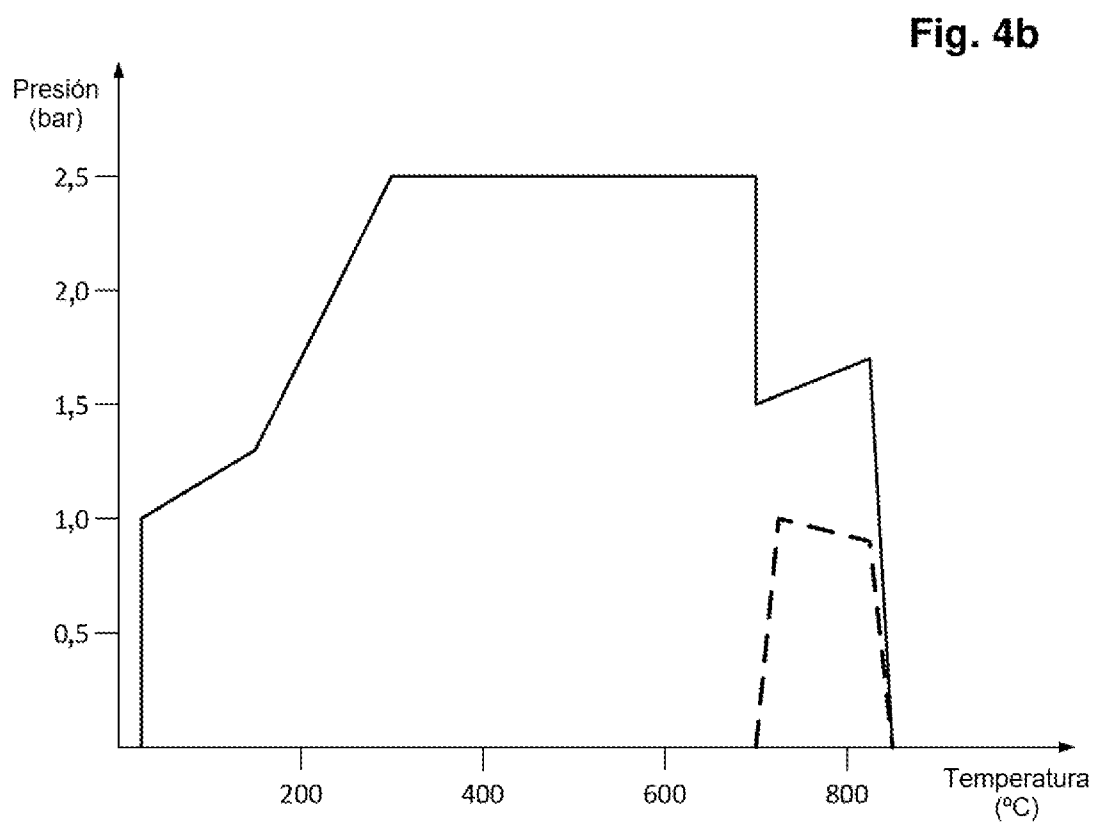
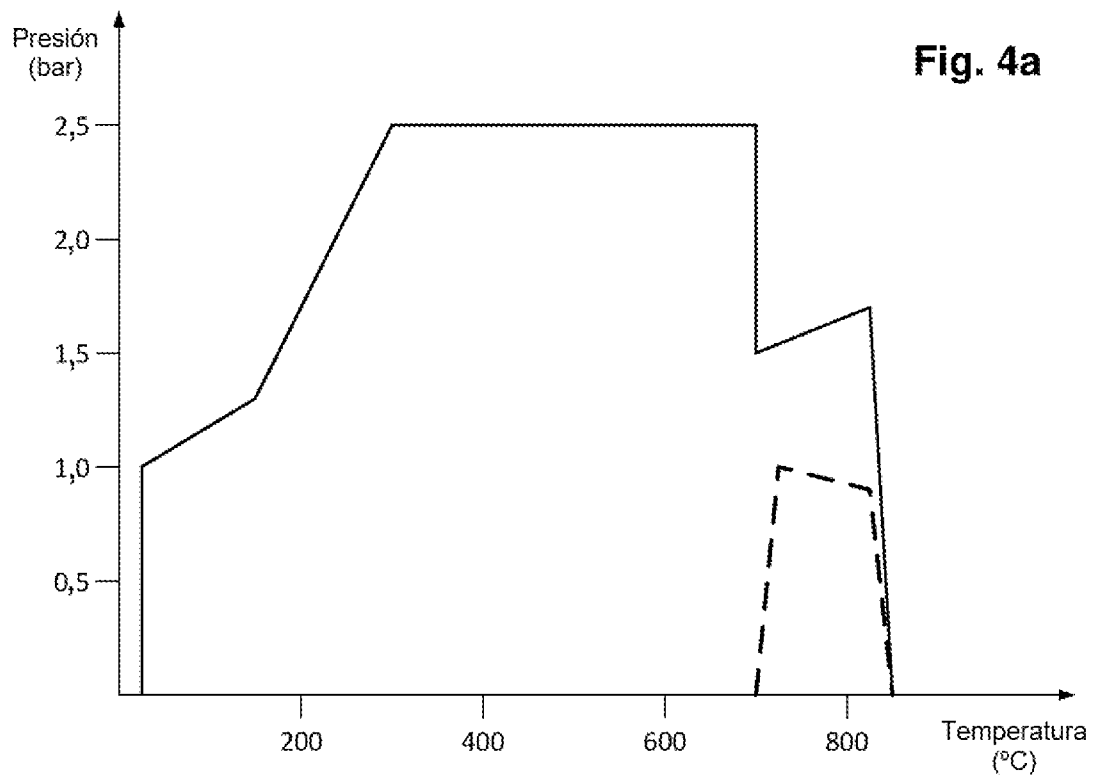


Fig. 4c

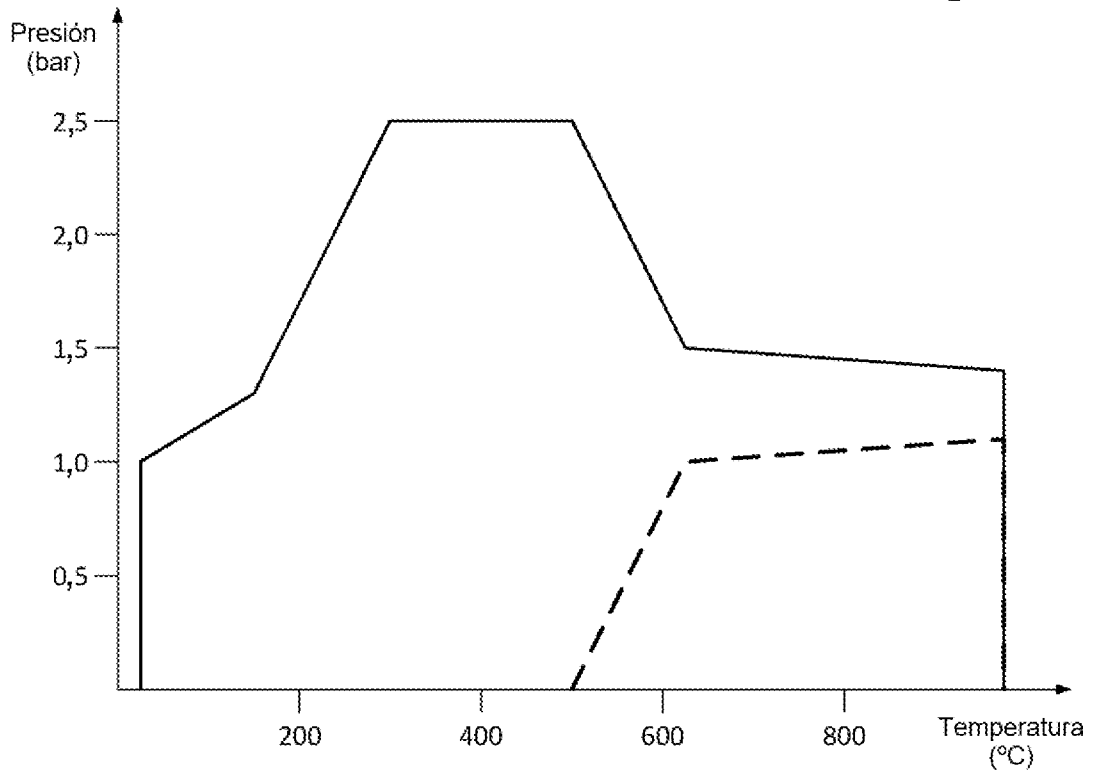


Fig. 5

